

# MILITAAROBJEKTIDE VALVETEHNOLOOGIA ARENG

*Andres Udal, Jaanus Kaugerand, Raul Savimaa, Olev Märten*



**Ülevaade.** Artikkel analüüsib viimastel aastatel maailmas käivitunud infotehnoloogilisi arenguhüppeid, mis on toonud olulisi muutusi valvesüsteemide alale. Militaarobjektide valvesüsteeme on käsitletud nii sensorseadmete, süsteemi-arhitektuuri kui ka üha rohkem tehisintellekti kasutava andmetöötluse vaates. Käsitluse süstematiseerimiseks on esile toodud neli põhilist alamsüsteemi ning teema sidumiseks maailma arengusuundadega on analüüsitud kaheksa olulise infotehnoloogilise uurimisteema kasvukõveraid.

Detailsemalt käsitletud sensorseadmed on järgmised: 1) valvekaamerad nähtava valguse, lähiihfrapuna- ja soojuskiirguse diapsoonidele; 2) sensoritega varustatud targad piirdetarad; 3) süsteemid mehitamata õhusõidukite avastamiseks ja jälgimiseks. Kaamerate puhul on analüüsitud kujutise sensorite arengutendentse ja DORI (detekteerimine, jälgimine, eristamine, identifitseerimine) tuvastusstandardit. Artiklis käsitletakse olulisemaid termineid ning arengusuundi, pidades silmas materjali võimalikku kasutamist tehniliste erialade väljaõppes Kaitseväe Akadeemias ja mujal<sup>1</sup>.

**Võtmesõnad:** militaarobjektide valvesüsteemid, valvekaamerate tehnoloogia areng, välispiirete targad piirdetarad, mehitamata õhusõidukite avastamissüsteemid, multi-spektraalne ja -staatiline lähenemine, andmete väärindamine

**Keywords:** security systems for military objects, development of security cameras, smart perimeter fence systems, unmanned aerial vehicle detection systems, multi-spectral and multistatic approaches, data valorization

## 1. Sissejuhatus ja neli olulist tehnoloogiaühpet

Viimase kümne-viieteistkümne aasta jooksul on maailmas toimunud ülikiire areng info- ja kommunikatsioonitehnoloogia (IKT) mitmes alamvaldkonnas, mis on aluseks nüüdisaegsetele valvesüsteemidele. Eelkõige võib siin nimetada nelja pöördelist arengumuudatust: a) uued võimekad hinnatõhusad

---

<sup>1</sup> Artikkel on valminud Kaitseväe rahastatud uurimisprojekti MINKM21093A „Mehitamata objektikaitse eeluuring“ toetusel. Lisaks tunnustavad autorid Robert Bosch OÜ turvasüsteemide peaspetsialisti hr Andres Penderi kõrgetasemelist konsultatsiooniabi valvekaamerate alal.

valvekaamerad ja muud sensorseadmed; b) arvutusvõime toomine sensorseadmetesse; c) suurandmevoogude käsitlemise süsteemne metoodika; d) tehisintellekti ja masinõppe tarkvara objektide automaattuvastuseks (Aceto jt 2019; Vial 2019; Orztemel, Gusev 2020)<sup>2</sup>. Iseloomustame allpool lühidalt nimetatud nelja läbimurret.

**Sensortehnoloogia.** Vaieldamatult tähtsaimad sensorseadmed valve-süsteemide jaoks on kaamerad, mille abil saab vaadelda nii nähtava valguse lainepikkusi 0,4–0,7  $\mu\text{m}$ , lähiinfrapunakiirgust 0,7–1  $\mu\text{m}$  kui ka soojuskiirguspiirkonda 3–14  $\mu\text{m}$ . Muud tüüpi andurid (raadiosignaalide, magnetväljade, vibratsiooni- ja helitundlikud) täidavad valvesüsteemides üldjuhul abifunktsiooni. Valvekaamerate juures on olnud võtmeküsimuseks pooljuhtide sisemist fotoefekti ära kasutavate maatriksdetektorite väljatöötamine, mis registreeriksid footonite ergastatud elektrone. Seda ülesannet on tegelikult lahendatud juba alates 1960. aastate lõpust (Fossum 1997, Bigas jt 2006), kuid laialdaseks kasutuseks piisavalt head CCD-detektorid (*Charge Coupled Devices*), mis põhinevad fotoelektronide salvestamise-nihutamise metoodikal, suudeti tootmisse juurutada pigem alles 1990. aastatel. Oluline läbimurre madala hinna ja energiatõhususe suunas kõikvõimalike kaasas-kantavate seadmete (nt mobiiltelefonid) jaoks saabus aga 2005.–2010. aastal, mil pooljuhtkiipide CMOS-pealiini (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) tehnoloogia abil valmistatud detektorid saavutasid sama kvaliteedi nagu CCD-detektorid (Fossum ja Hondongwa 2014, Sukhavasi jt 2021). Mitte vähem tähtis areng soojuskiirguskaamerate vallas on toimunud viimase 10–15 aasta jooksul koos jahutust mittevajavate bolomeetriliste detektorite tehnoloogia laialdase kasutuselevõtuga (Lohrmann jt 2013).

**Arvutuste toomine sensorseadmetesse.** Keskkonnaga kontaktis toimivate hajujuhtimise süsteemide, nagu multiagentsüsteemid (*Multi-Agent Systems*) ja võrgustatud sardsüsteemid (*Networked Embedded Systems*), uuringuid on tehtud juba üle 25 aasta. Oluline murdepunkt nende detsentraliseeritud arvutusi kasutavate sensorsüsteemide arendamises saabus 2007. aastal, mil USA Presidendi Nõukoda soovitas võtta küberfüüsikalised süsteemid (*Cyber-Physical Systems*, CPS) esimeseks prioriteediks info- ja kommunikatsioonitehnoloogia valdkonnas (US President's Council 2007). Pärast seda algas kahe moodsa võrku ühendatud sensorseadmeid käsitleva tehnoloogiateema, küberfüüsikaliste süsteemide ja asjade interneti (*Internet of Things*, IoT) kiire areng (Lee 2008; Sarma, Girao 2009; Azori jt 2010). Vastava teaduskirjanduse

---

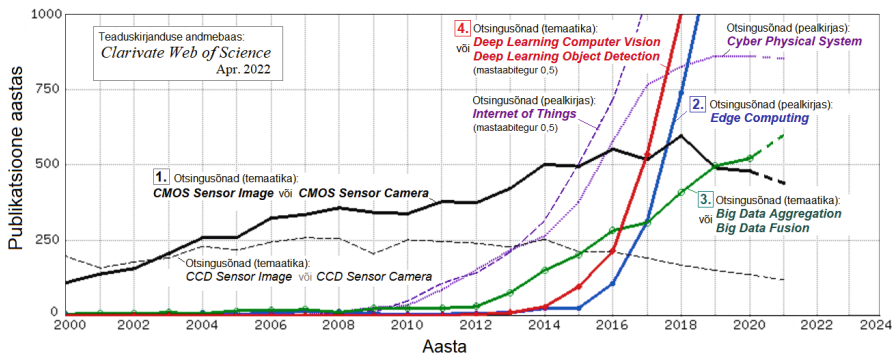
<sup>2</sup> Autorite soovil kasutatakse selles artiklis tekstisisest viitamist.

esiletõusu 2009.–2010. aastal on kajastatud joonisel 1. Küberfüüsikaliste süsteemide paralleelvorm tööstuse vajadusteks on Industry 4.0 tööstusrevolutsiooni programm, mille käivitas Saksamaa 2011.–2012. aastal (Aceto jt 2019). Tuleb aga märkida, et valvesüsteemid kasutavad küll detsentraliseeritud andmekorje ja hajusarvutuste struktuuri nagu CPS ja IoT, kuid ei pretendeeri (seni veel) objektivalve juhtimisele ning hoiduvad ka globaalsest internetiühendusest. Valvesüsteemide jaoks on oluline servaarvutuste (*Edge Computing*) kontseptsioon, millega hakati andmetöötlust tooma tsentraalsetest (pilve)serveritest valvekaameratesse, et saada üle sidevõrkude läbilaskvuspiirangutest andmemahutude kiire kasvu tingimustes. Joonis 1 kinnitab servaarvutuste järsku tähtsustumist 2015.–2016. aastal.

**Sensorandmete väärindamise tehnoloogia.** Koos asjade interneti käivitumise ja videoandmevoogude kahekordistumisega iga kolme aasta järel (Subudhi jt 2019; Cisco Report 2020) on muutunud hädavajalikuks süsteemne lähenemine suurtele andmemahutudele (Ahmed jt 2017; Ryan, Watson 2017). Mahukad valvekaamerate ja teiste objektivalve sensorite andmevood vastavad kahele suurandmete (*Big Data*) kontseptsiooni tunnuskriteeriumile (maht ja tekkekiirus), ainult kolmas tunnuskriteerium ehk varieeruvus võib olla valvesüsteemi korral väike ja seetõttu objektivalve ülesanne mõnevõrra lihtsam kui suurandmete üldjuhtum, mis käsitleb mittekorrastatud ja mittestruktureeritud toorandmeid (Reis 2019; Seng, Ang 2019). Kõige olulisemad sensorandmetega tehtavad operatsioonid on näiteks toorandmete puhastamine, toorandmete ajaliste ja ruumiliste muutuste kokkuvõtmine ehk agregeerimine (*Data Aggregation*), multimodaalsete eri sensorite andmevoogude sulandamine (*Data Fusion*), toorandmete struktureerimine mõtestatud informatsiooniks ja olukorratäpse genereerimine (Abdelmoneem jt 2018; Reis 2019; Seng, Ang 2019). Joonis 1 kinnitab, et andmevoogude tehnoloogia teaduslik käsitlus muutus olulise tähtsusega uurimisteenemaks 2012. aastal.

**Süvaõppe meetodid objektide automaattuvastuseks.** Tuleb rõhutada, et esmatähtis paljude digitaalkaameratega valvesüsteemides on tehisintellekti meetodeid kasutatav tarkvara, mis lihtsustab valveoperaatorite tööd ja saab hakkama nn masinägemise (*Computer Vision*) üldteema alla kuuluvate objektide tuvastamise (*Object Detection*) standardolukordadega. Vastavaid tarkvarauuringuid on tehtud mitukümmend aastat, kuid inimoperaatoreid iseloomustav kujutiste äratundmise 95%-line täpsus autode numbrimärkide puhul suudeti saavutada alles 2012. aastal ja inimeste nägude puhul 2015. aastal (Lu, Tang 2015; Liu jt 2020). Lähimurre saavutati tänu mitmele tarkvaratehnoloogilisele uuendusele paljukihiliste tehisnärvivõrkude (*Deep Neural Networks*) treenimise metoodikas, mida nimetatakse ka süvaõppeks

(*Deep Learning*). Enne 2015. aasta avastusi oldi seisukohal, et sügavaid, üle kolme kihiga närvivõrke oma tuhandete ja miljonite häälestusparameetritega on liiga raske optimeerida. Pärast 2015. aasta edusamme algas süvaõppe intensiivne arendamine, praeguseks on saavutatud suuri edusamme kümnete-sadade kihtide ja miljardite häälestusparameetritega tehisnärvivõrkude alal, mis võivad pärast miljonite näidiskujutiste abil tehtud treeningut võistelda kujutiste äratundmises edukalt inimoperaatoritega (Zhang, Hong 2019; Dong jt 2021). Joonisel 1 on näidatud vastavate teadustööde plahvatuslik kasv, mis muuhulgas on saanud aluseks valvekaamerate videoanalüütika üha kiirenevale täiustamisele viimase viie aasta jooksul.



**Joonis 1.** Valvesüsteemide jaoks olulise tehnoloogia areng teaduspublikatsioonide statistika alusel [Web of Science 2022]. Hinnasoodsate CMOS-kaamerate sujuvale esiletõusule 2005.–2010. aastal järgnes suurandmete teema lineaarne tähtsustumine 2012. aastal ning 2015.–2016. aastal kaks eksponentsiaalset hüpet objektide automaattuvastuse ja sensorseadmete arvutusvõime alal. Kaks viimast hüpet näitavad täiustatud videoanalüütikaga uue põlvkonna valvekaamerate väljatöötamise algust ligikaudu viis aastat tagasi. Numbritega on märgitud neli võtmetehnoloogiat, mis vääriavad eraldi esiletõstmist. Ingliseelsete terminite selgitus on sissejuhatuses.

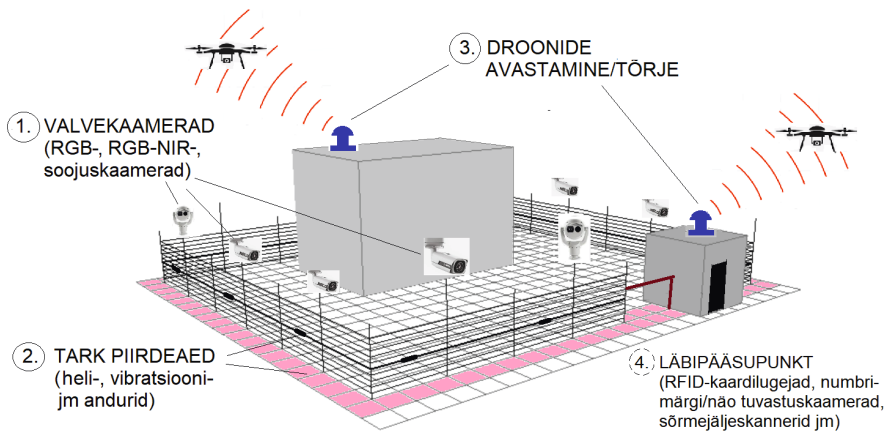
Artikli autorite arvates on kaitseotstarbeliste objektide valvesüsteemidele rahuajal esitatavad nõuded üldjoontes sarnased kriitilise tähtsusega tsiviilobjektide valvenõuetega. Ent militaarobjektidega kaasneb ka mitmeid lisa-keerukusi, näiteks:

- peaaegu alati on kohustuslik jälgida välispiire ehk perimeetrit;
- tuleb lähtuda süsteemide ja seadmete funktsionaalsusest, mitte odavaimast hinnavariandist;
- lääneriikide majandusruumi mittekuuluvate riikide toodangut ei soovitata kasutada;
- küberturvalisuse nõuete tõttu ei saa kasutada mugavat traadita sidet;

- soovitatav on ette näha ümberpaiknemise võimalusi õppuste ja häireolukordade ajal;
- uue nõudena peaks olema kehtestatud droonide jälgimine.

## 2. Objektivalve füüsilised alamsüsteemid

On selge, et tänapäeval on kõigil tehnilistel süsteemidel nii riist- kui ka tarkvaralised lahendused, mis kasutavad erinevatel füüsilistel printsiipidel põhinevaid sensoreid ja erinevaid infotötluse tehnoloogiaid. Inimoperaatorite kaasamisel lisandub sellele veel hulk füsioloogilisi, organisatsioonilisi ning juriidilisi aspekte. Selleks et nimetatud keerukas ainevaldkonnas süsteemset lähenemist luua, on otstarbekas eristada põhilisi füüsilisi alamsüsteeme, millel on oluline tähtsus enamiku militaarobjektide valves. Põhilisi alamsüsteeme defineeriv vähendatud skeem on esitatud joonisel 2.



**Joonis 2.** Militaarobjektide valve põhiliste füüsiliste alamsüsteemide illustratsioon: 1] päeva- ja öönägemisvõimega valvekaamerad; 2] anduritega varustatud tark piirdetara perimeetri jälgimiseks; 3] droonide avastamise ja tõrje süsteem; 4] mitmeid seadmeid koondav läbipääsupunkt inimeste ja sõidukite kontrolliks

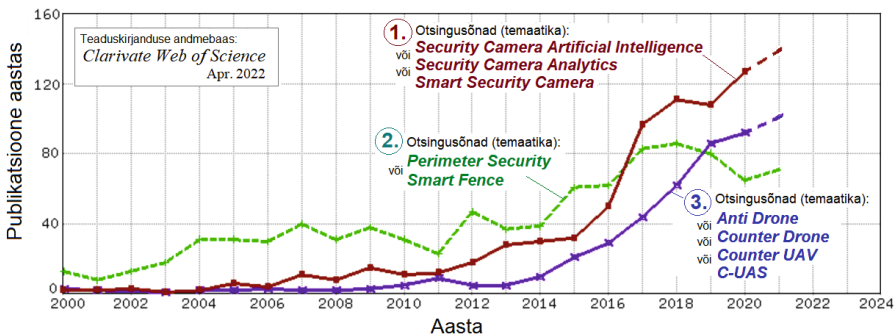
Joonisel 2 esitatud skeem selgitab võimalikult lihtsustatud kujul tüüpilise objektivalvesüsteemi alamsüsteeme.

1. Hajusalt paigutatud valvekaamerad (RGB-päevanägemine; lähiinfrapuna- piirkonnale ehk öönägemisele laiendatavad RGB-NIR-kaamerad, soojuskiirguskaamerad).

2. Tark piirdetara koos arvutiseeritud sensorsõlmede ja sidekaablitega (vaskkaablitel või fiiberoptikal põhinevad lahendused) koos võimalike laiendustega, näiteks pinnasesse paigutatud vibratsiooniandurite kujul.
3. Droonide jälgimise alamsüsteem, mis on muutunud aktuaalseks viimastel aastatel ja võib kasutada erinevaid tehnoloogiaid (vt allpool droonivastase tehnoloogia alapunkti).
4. Väravavalve, mis kasutab palju inimoperaatoreid ja ettevõtlusest tuntud isikutuvastusvahendeid.

Joonisel 2 esitatud lihtsustatud skeemil pole näidatud sisemisi turvatsoone, mille ümber võivad olla omakorda piirdetarad. Näidatud pole ka näiteks lennuväljade ja meresadamatega seotud spetsiifilisi alamsüsteeme.

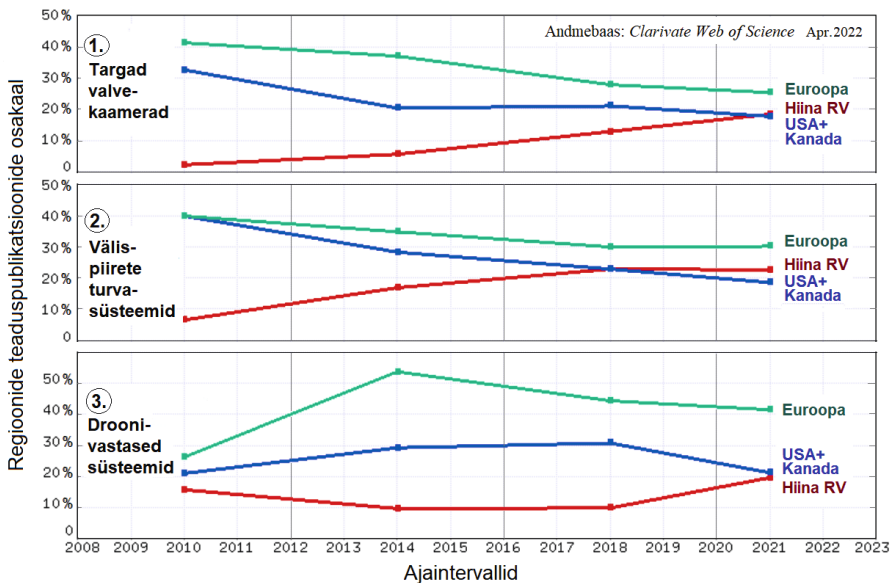
Joonisel 2 eristatud alamsüsteemide arengut analüüsid võib juba joonise 1 põhjal näha kaameratega seotud kahe tehnoloogiasuuna kiiret arengut aastatel 2015–2016. Need suunad on arvutusvõimsuse toomine valvakaameratesse ja tehisintellekti kasutamine objektide automaattuvastuseks. Võib ennustada, et samasugune kiire areng on toimumas ka droonide jälgimise ja tõrje vallas, kuna droonid on hakanud valvatavaid objekte tõsiselt häirima (Park jt 2021; Lyokou jt 2020; Shi jt 2018). Joonisel 3 on näidatud täpsemalt teadusuuringute dünaamika, mis on seotud kolme tähtsaima alamsüsteemiga.



**Joonis 3.** Teadusuuringute dünaamika objektivalve kolme põhilise alamsüsteemi jaoks. Näeme, et piirdetarade uuringud [väljendite *Perimeter Security*, *Smart Fence Systems* otsing] on olnud kaua huviorbiidis ning on praeguseks pigem kõrgtaseme ületanud ilma olulise languseta. Videoanalüütikaga varustatud tarkade valvakaamerate valdkond [väljendite *Smart Security Camera Analytics*, *Artificial Intelligence* otsing] näitab olulist arengut juba üle kümne aasta. Droonivastaste tehnoloogiate uuringud [väljendite *Anti Drone*; *Counter Drone*; *Counter Unmanned Aerial Vehicle*, *C-UAV*; *Counter Unmanned Aerial Systems*, *C-UAS* otsing] on aga selgelt uem valdkond, mis hakkas kiirelt arenema pärast 2014. aastat.

Joonisel 3 esitatud teadusuuringud kinnitavad suhteliselt pikaajalist huvi tarkade piirdetarde vastu, juba kümme aastat pidevalt suurenevat huvi valvekaamerate videoanalüütika ja tehisintellekti vastu ning uue teemana pärast 2014. aastat oluliseks muutunud droonivastase tehnoloogia esiletõusu. Kui arvestada ka Ukraina sõja kogemusi, on selge, et droonide jälgimine ja tõrjumine peavad saama uued tõhusad lahendused Eesti militaarobjektide valves.

Maailma arengu seisukohalt võib pakkuda huvi küsimus, kuivõrd on Hiina Rahvavabariik esindatud kriitilise valvetehnoloogia uuringutes, mida käsitleb joonis 3. Võrdlus Põhja-Ameerika ja Euroopa teaduspiirkondadega mitmeaastaste ajaintervallide kaupa on esitatud joonisel 4.





**Joonis 4.** Kolme valitseva teaduspiirkonna (Euroopa, Põhja-Ameerika ja Hiina RV) suhtelise osakaalu dünaamika võrreldes maailma teaduskirjanduse kogumahuga joonisel 3 käsitletud kolme põhilise valvetehnoloogia jaoks. Euroopa piirkonna hulka on arvestatud liitlasriigid Türgi ja Iisrael (välja on jäetud Venemaa ja Valgevene väike panus).

Joonis 4 näitab, et kriitiliste valvetehnoloogiate alal domineerib Euroopa piirkond ja seda eriti selgelt (üle 40% maailma panusest) just droonivastaste tehnoloogiate vallas. Hiina Rahvavabariigi tõus on stabiilne, kuid teaduspublikatsioonide kogumaht jääb veel 2,5–3 korda alla Euroopa ja Põhja-Ameerika ühispanusele ning lähiaastatel Hiina Rahvavabariigi valitsemist ette näha pole. Huvitava faktina võib märkida India suurt panust tehisintellektiga valvekaamerate vallas (ligi 20%, võrreldav USA ja Hiina RV-ga).

Ukraina sõja agressorriikide panus on tühine ja jääb üldiselt suurusjärku 1% maailma teadusuuringute kogumahust. Siin tuleb arvestada, et tegemist on kõrgtehnoloogiliste uurimisteede kompleksiga, mis haarab uusi ekspordi-piirangutega päeva-, öö- ja termokaamerate sensoreid, tehisintellekti rakendamist, hajussüsteemide ülesehitust, miniatuurseid radareid jm tipp tehnoloogia valdkondi.

### 3. Süsteemne vaade arhitektuurile ja andmetele

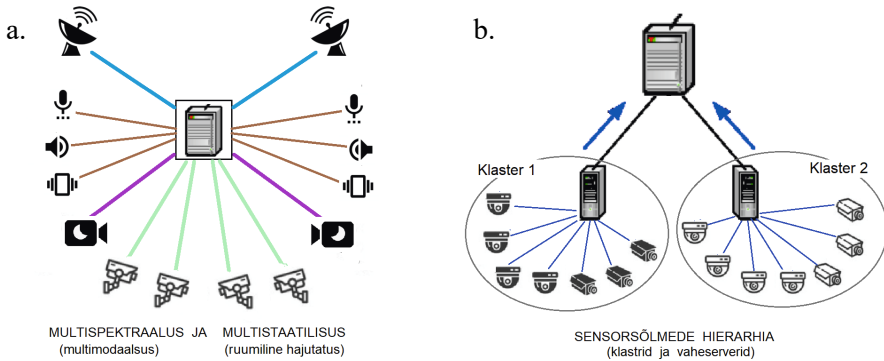
Kui käsitleda tehniliste süsteemide konstrueerimist, on komponentidel ehk praegusel juhul sensorseadmetel küll suur tähtsus, aga lõppkokkuvõttes määrab väljatöötatud lahenduse kvaliteedi siiski süsteemi tase. Tänapäeval, suurandmete ajastul, peab arvestama veel andmetehnoloogilise aspektiga. Õigesti konstrueeritud süsteem suudab isegi mitteideaalsete komponentide korral kindlustada hea tulemuse, sest süsteemi tasemel on võimalik dubleerida ja vigu kompenseerida. Varajastes süsteemides oli arhitektuur lihtne ja tarkvara koondatud keskarvutisse. Tänapäeval on aga arhitektuur hajutatud ja hierarhiline ning enamik komponente on n-ö targad ehk riistvara toimimises on suur tähtsus äärearvutuste tarkvaral (Dennis jt 2012; Norman 2014; Tilley 2020). Et kuidagi struktureerida reaalse valvesüsteemide ülesehituse metoodikat, on mõtet taandada alamülesannete käsitlus riistvara-tarkvara ja komponentsüsteemi tasandile näiteks selliselt, nagu see on esitatud joonisel 5.

	 RIISTVARA	 TARKVARA
KOMPONENTIDE TASE	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ RGB-NIR CMOS-kaamerad</li> <li>◆ Termokaamerad (soov. bolomeetriselised)</li> <li>◆ Targad piirdetarad (soov. fiiberoptilised)</li> <li>◆ Droonivalve raadioskannerid ja radarid</li> <li>◆ Arvutusvõimsus sensorsõlmedes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Toorandmete esmatöötlus (andmete puhastamine, üldistamine ehk agregatsioon)</li> <li><input type="checkbox"/> Videoanalüütika tehisintellekt süvaõppe alusel (DORI = detekteerimine, jälgimine, klassifitseerimine, identifitseerimine)</li> <li><input type="checkbox"/> Droonide detekteerimine ja identifitseerimine</li> </ul>
SÜSTEEMI TERVIKVAADE	<ul style="list-style-type: none"> <li># Multisensor-hajusarhitektuur (multispektraalsus ja -staatilisus)</li> <li># Arvutusvõimsuste jaotamine sensorseadmed vs serverid</li> <li># Küberturvalised sideühendused</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Toorandmete väärindamine informatsiooniks</li> <li><input type="checkbox"/> Multimodaalsete sensorandmete sulandamine (fusioon), sh nt droonide triangulatsioon</li> <li><input type="checkbox"/> Tehisintellekt andmemustrite tuvastamiseks</li> <li><input type="checkbox"/> Olukorrateadlikkuse ja -juhtimise teabe süntees</li> </ul>

**Joonis 5.** Valvesüsteemide alamülesannete taandamine komponentsüsteemi ja riistvara-tarkvara tasandile



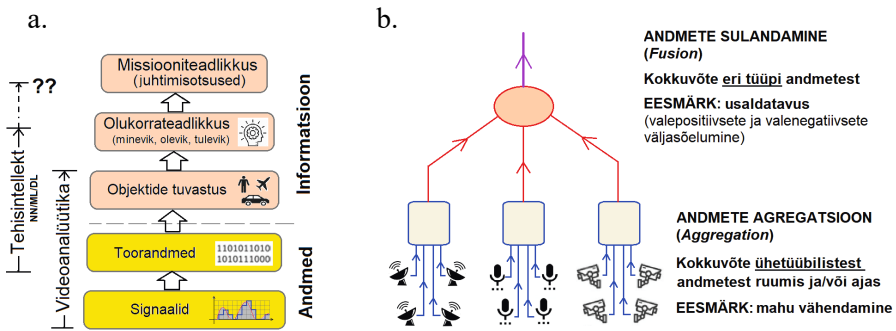
Kooskõlas 2. punktis defineeritud peamiste alamsüsteemidega loetletakse joonisel 5 põhilised sensorseadmed ja nendes kasutatav (äärearvutuste) tarkvara. Süsteemi tasemel on käsitletud hierarhilist, vähemalt kahetasemelist (sensorseade *versus* keskserver) hajusarhitektuuri ning tarkvara jaotust nende kahe taseme vahel, samuti andmete väärimist informatsiooniks, mille alusel oleks võimalik teha juhtimisotsuseid. Joonisel 6 on jätkatud süsteemi hajusarhitektuuri põhimõtete selgitamist.



**Joonis 6.** Hajussüsteemide arhitektuuri põhimõtete selgitus: a) multispektraalsus [eriliigiliste sensorite kooskasutus] ja multistaatilisus [ruumiline hajutus]; b) hierarhilisus [juhtimise ja infovahetuse vahetasandid]

Joonise 6a selgituseks võib märkida, et terminite *multispektraalsus* ja *multistaatilisus* asemel, mis on kasutusel eelkõige erinevates asukohtades ja mitmetel sagedusel funktsioneerivate radaritega õhukaitssüsteemide puhul, võiks tarvitada ka arvutiala termineid nagu *sensorseadmete multimodaalsus* ja *hajusarvutussüsteem*. Joonis 6b illustreerib süsteemiarhitektuurilist asjaolu, et paljude kaamerateaga valvesüsteemides tuleb kaameragruppide teenendamiseks võtta kasutusele hierarhiline struktuur koos vaheserveritega.

Lisaks süsteemiarhitektuuri küsimustele on valvesüsteemides kaamerate toodetava videoinfo ülisuure mahu tõttu väga oluline ka andmetehnoloogiline vaade. Sellist maailmas toimuvat arengut on kajastatud joonisel 1, kus on näidatud asjade interneti kiiret laienemist 2010. aastal ja sellega seotud suurandmete tehnoloogia tähtsustumist 2012. aastal. On selge, et iga valvesüsteemi põhiline väljund ei ole mitte toorandmed, vaid juba mõtestatud informatsioon kaitstava objekti olukorrast ehk olukorradeadlikkus (*Situation Awareness*). Täisautomatiseeritud valvesüsteem peaks suutma tehisintellekti abil teha ka juhtimisotsuseid (*Situation Management*), milleks võivad olla näiteks valvepatruulli või valvedrooni väljasaatmine. Seda mitmeastmelist andmete väärimise protsessi on näidatud joonisel 7a.



**Joonis 7.** Oluliste andmetehnoloogiliste põhimõistete selgitus: a) andmete informatsiooni väärdamise etappide üks võimalik esitus; b) andmete agregatsiooni ja sulandamise operatsioonide selgitus. Tehisintellekti tehnoloogia lühendid: NN = Neural Networks, ML = Machine Learning, DL = Deep Learning

Joonise 7a selgituseks tuleb märkida, et andmete väärdamise protsessi alumised astmed on suhteliselt kergesti automatiseeritavad, aga ülemistel astmetel läheb kontroll üha rohkem inimoperaatorite kätte. Juba varasem lihtsam videoanalüütika suutis suhteliselt kergesti registreerida pikslite muutusi kaamerakaadrite vahel. Lähimurre objektide automaattuvastuse suunas kunstlike närvivõrkude, masin- ja süvaõppe meetoditega algas 2014. aastal (vt joonis 1). See, kui kaugemale on võimalik minna automatiseerimisega, nii et valvesüsteemi tehisintellekt suudaks luua täispildi valvatava objekti olukorrast ning võtta vastu ka juhtimisotsuseid, on esialgu veel lahtine.

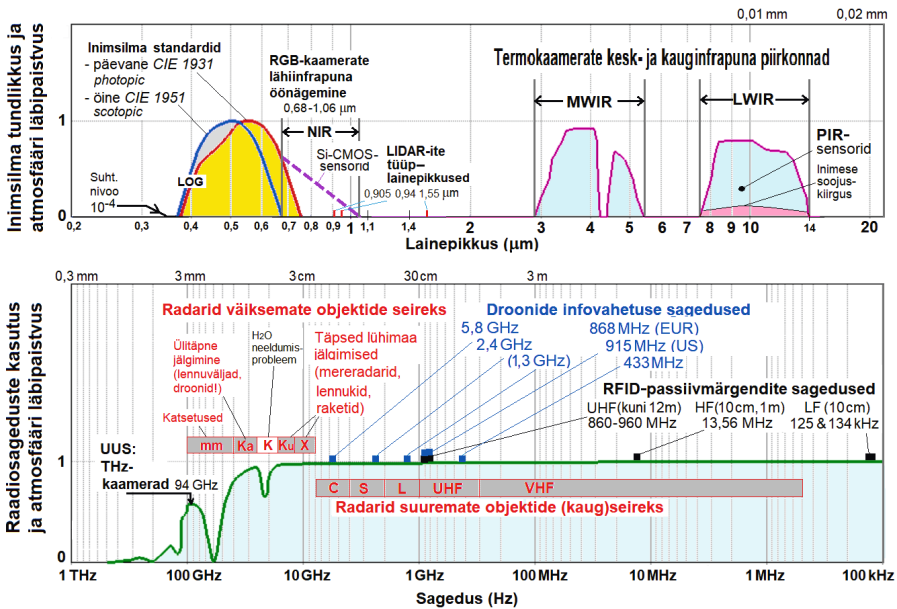
Joonis 7b illustreerib kahte olulisemat andmekäsitluse operatsiooni sensorvõrkudes. Kuigi teaduskirjanduses esineb erinevaid lähenemisi, tähistab agregatsioon üldiselt siiski samatüübiliste sensorandmete kokkuvõtet ruumis ja/või ajas ning selle eesmärk on vähendada andmemahtu. Siia hulka sobib ka video toorinfo kokkupakkimine, mille puhul antakse edasi vaid tugikaadreid ja muutusi. Andmete sulandamine tähistab eritüübiliste (multimodaalsete) sensorandmete võrdlust ja ühendamist ning selle eesmärk on vähendada vigu. Märkusena peab lisama, et sulandamise ja agregeerimise operatsioone võib teha ka teises järjekorras ning vajadusel korrata.

## 4. Füüsikal põhinev sensorite klassifikatsioon

Sensorseadmete kirevas maailmas orienteerumiseks on vaja valida mingisugune klassifitseerimise alus, mis vähendaks käsitletavate variantide hulka. Üks võimalus on lähtuda füüsikalistest toimemehhanismidest, kuna nende

arv on piiratud. Seejuures on võimalik jagada need kaheks: elektromagnetlainetel põhinevad sensorseadmed ja kõik ülejäänud.

**Elektromagnetlainetel põhinevad sensorseadmed.** See arvukas, peamine kaugmõjuvõimega sensorite klass haarab enda alla nähtava valguse koos infrapunakiirgusega lühilainelises osas ja raadiolained pikalainelises osas. Veelgi lühilainelisemaid elektromagnetkiirgusi, nagu ultraviolet-, röntgen- ja gammakiirgus, valvesüsteemid tavaliselt ei kasuta ja neid me ei vaatle (need võivad olla tähtsad keskkonnareostuse seires või pääslates). Infrapunakiirguse ja raadiolainete praktilise kasutamise puhul välitingimustes võib vaatluse alt välja jätta ka kõik lainepikkused, mis atmosfääris intensiivselt neelduvad. EM-lainete lainepikkustel põhinev sensorseadmete klassifikatsioon on esitatud kokkuvõtlikult joonisel 8.



**Joonis 8.** Elektromagnetlaineteid kasutavate sensorite spektralaade illustreeriv kokkuvõte: nähtav valgus ja infrapunakiirgus (ülal) ning raadiolained (all). Näidatud on tüüpilise inimese silma tundlikkuskõverad tugeva valgustusega värvinägemisele ja madala valgustusega öö nägemisele, samuti lähifotograafia NIR-piirkond, mida suudavad registreerida ränipõhised pooljuhtsensorid. Termokaamerate jaoks on oluline kuumade kehade kiirguse MWIR-aken atmosfääris ja eriti toatemperatuurilähedaste kehade pikalainelise infrapunakiirguse LWIR-aken. Raadiolainetel põhinevate sensorite jaoks on atmosfäär hästi läbipaistev kuni sagedusteni 20 ja 50 GHz, mille lähedal on võimalik leida sobivaid lainepikkusi dronide detekteerimise radaritele X-, Ku- ja Ka-sagedusribades.

Joonisel 8 on esitatud originaalne füsioloogilis-tehnoloogilistele põhimõtetele tuginev rüni-lähiinfrapuna spektrivahemiku definitsioon. See on piirkond punasest valgusest ühemikromeetrise lainepikkuse poole, mida inimsilm ei näe, aga mille registreerib raskusteta enamik rüni-põhiseid fotosensoreid (Infrared 2023). Selle piirkonna üheks servaks võib võtta lainepikkuse 0,68 mikromeetrit, mille puhul langeb inimsilma öönägemisretseptorite ehk kepikeste suhteline tundlikkus ühe kümnetuhandiku tasemele (Luminous Efficacy 2023). Teiseks servaks võib võtta lainepikkuse 1,06  $\mu\text{m}$ , mille puhul kiirguse neeldumise teepikkus kvaliteetses rünis ületab toatemperatuuril 1000  $\mu\text{m}$  piiri (Silicon Absorption 2023). Siit tuleneb joonisel 8 kujutatud lähiinfrapunakiirguse NIR-piirkond 0,68–1,06  $\mu\text{m}$ , mida suudavad edukalt vaadelda nähtava valguse RGB-kaamerad, kui on kõrvale nihutatud tavalukorras sensorkiibi ees olev infrapunakiirguse filter. Täpsem neeldumise punapiir ehk rüni läbipaistvaks muutumise piir on ligikaudu 1,1  $\mu\text{m}$ , mis on määratud rüni keelutsooniga 1,12 eV (Silicon Absorption 2023). Joonisel 8 on näidatud ka kolm lidarite ehk optiliste radarite populaarsemat lähiinfrapuna lainepikkust (Lidar 2023). Pikem lainepikkus 1,55  $\mu\text{m}$  on inimsilmale ohutum ja militaarrakendustes eelistatum, kuna selle skaneerivat testkiirgust ei näe ülalviidatud öönägemislaiendusega RGB-NIR-valvekaamerad.

Soojuskiirguskaameratele sobilike lainepikkuste kohta on joonisel 8 esitatud atmosfääri läbipaistvuse aknad MWIR (*Medium Wave Infrared*) ja LWIR (*Long Wave Infrared*), kus kaugvaatlused on hästi tehtavad, sealhulgas näiteks MWIR-i puhul on võimalik objekte avastada kuni 55 km kauguselt (Ascendent 2022). Lainepikkuse 2  $\mu\text{m}$  ümbruses on tegelikult ka veel lühilainelise infrapunakiirguse SWIR-aken, mille kasutamiseks pole aga piisavaid põhjendusi leitud (Birch, Loo 2017; Infrared 2023). LWIR-spektrialast pikemate lainepikkuste suunas kuni THz-kiirgusteni on ligi kahe dekaadi laiune ala, kus atmosfäär on kaugvaatlusteks halvasti läbipaistev. Küll aga pole selles lainepikkuste vahemikus välistatud sensorseadmed, mille abil avastada pääslates ohtlikke aineid, näiteks lõhkeaineid või narkootikume (Frederici jt 2005; Zhang jt 2018).

Eksisteerivad ka uudsed raadiolaineid kasutavad sensorseadmed, millel puudub täpne sagedus, näiteks uudne ülilairiba radar (*Ultra Wide Band Radar*, Ultra-wideband 2023). Sellise radari tööpõhimõte toetub sellele, et väljakiirrataval impulsil on küll kandesagedus (nt mõned gigahertsid), aga impulss on niivõrd lühike, et vaateleja jaoks tekib väga lai spekter, näiteks sajad megahertsid (Siwiak 2001; Rodenbeck jt 2005). See on tähtis sõjalistes rakendustes, kuna kiirgusvõimsus on hajutatud üle laia sagedusriba ja radarit on raske tuvastada. Samas võivad veelgi huvipakkumamad kõrgtehnoloogilised

rakendused olla lõhkekehade avastamine pinnasest ja vaatlused läbi seinte (Carin jt 1999; Siwiak 2001).

**Muud sensorseadmed, mis ei kasuta elektromagnetlaineid.** See sensorgrupp on tegelikult väikesearvuline ning haarab põhiliselt heli ja vibratsiooni kasutamist. Multimodaalses süsteemiarhitektuuris (vt joonis 6a) töötavad need andurid koos kaameratega ja õigesti korraldatud andmete sulandamise korral (vt joonis 7b) aitavad vähendada valesid. Vastavate sensorite näited on koondatud tabelisse 1.

**Tabel 1.** Valvesüsteemides kasutatavad põhilised sensorseadmed, mis ei kasuta elektromagnetlaineid

Nr	Füüsikaline mõjur	Sensorseadme näited	Kommentaari
1.	Heli	Piirdeaia mikrofonid	Ruumiliselt hajutatud
2.	Ultraheli	Sonarid veealuste objektide seireks	Aktiivsed ja passiivsed, lai sageduste vahemik 1 kHz – 600 kHz
3.	Vibratsioon	Piirdeaia vibratsiooni-andurid, siseruumide aknaandurid	Ruumiliselt hajutatud, võimalik paigutus pinnasest ja laiema ala katmine
4.	Magnetväli	Metallidetektor pääslas	Detekteerimise kaugus 1–20 m sõltuvalt metallobjektide suuruselt

## 5. Valvekaamerate areng

### 5.1. Nähtava valguse ja lähiihfrapunakiirguse RGB-NIR-kaamerad

Võib üsna kindlalt väita, et iga valvesüsteemi kõige olulisemad sensorseadmed on ikkagi nähtava valguse kaamerad, sest nad võimaldavad häireolukordi mitte ainult avastada (detekteerida), vaid paljudel juhtudel kontrollida ka detaile, jõuda arusaamisele olukorrast ning võtta vastu juhtimisotsuseid (vt joonis 7a). Häireolukordade esialgsel avastamisel, eriti pikemate vahemaade puhul, võivad olla tõhusamad kas soojuskaamerad või radarid. Lähiihfrapunakiirguse NIR-kaamera puhul on ka üks ilmikas erand (vt joonis 8): RGB-NIR-kaamerate öönägemisrežiimis registreeritav mustvalge kaader võib olla auto numbrimärkide tuvastamiseks parem kui päeva-valguses registreeritud värviline pilt.

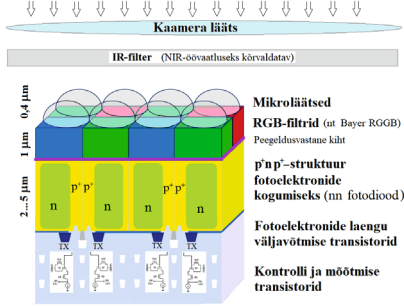
Peaaegu kohe pärast pooljuhtkomponentidega arvutite kasutuselevõttu 1960. aastatel ning mõningat edu mikrokiipide alal hakati uurima võimalusi pooljuhtidel põhinevate fototundlike maatriksensorite loomiseks. Nimelt on

pooljuhid väga sobivad fotovastuvõtjad tänu mõõduka suurusega sisemise energeetilise keelutsooni olemasolule ja võimalusele disainida sisseehitatud potentsiaaliprofiile, et lahutada ruumiliselt footonite tekitatud elektron-aukpaare. Samuti võib elektroodide pingestamisega neid profiile muuta. Läbi-murdelise artikli laengusidestus-maatriksfotosensorite (CCD) ideega avaldasid 1970. aastal USA-s Belli laboratooriumites töötavad teadlased Willard Boyle ja George Smith (Boyle, Smith 1970). Seda ideed peeti niivõrd tähtsaks, et 2009. aastal anti neile koos fiiberoptika alusepanija Charles Kaoga Nobeli füüsikapreemia.

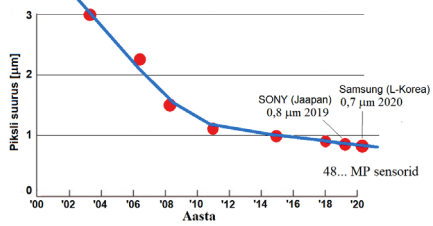
Nagu juba sissejuhatuses mainitud, arendati ligi 40 aastat edukalt seda CCD suunda, mis on täpne, aga energiakulukas ja aeglane. Samu esmaseid aluspõhimõtteid ehk pn-siirete sisseehitatud potentsiaali abil fotogeneeritud elektrone eristav CMOS-tehnoloogia saavutas teaduskirjanduses ülekaalu 2003. aastal (vt joonis 1). Müüginumbrites saavutas CMOS ülekaalu 2007. aastal. CMOS-tehnoloogia oluline eelis on tuginemine arvutikiipide pealiini tehnoloogiale, väike energiatarve, suur töökiirus, peaaegu piiramatul võimalusel suurendada pikslite arvu ja rakendada digitaalset videotöötlust. Tänapäeva üha suureneva nõudlusega mobiilsete IT-seadmete turul on CMOS-fotosensorite tööstus pidevas kasvutrendis. Selgituseks võib märkida, et esmase tööprintsibi mõttes on nii CCD-piksel kui ka CMOS-piksel sarnane ilma koormuseta päikesepaneeliga, mis kogub pinget ja laengut. CMOS-maatriksfotosensorite tehnoloogia olulisemad detailid on lahti seletatud joonisel 8.

Joonise 9 selgituseks võib märkida, et pärast 1999. aastat on toimunud üldine üleminek pööratud lahendusele, mille juures fotolaenguid koguv fotodiiodi osa on valguse mõttes eespool ja laenguid manipuleerivad transistorid allpool. Varasemates lihtsamates lahendustes läks osa valgust koguvast pinnast transistorite jaoks kaotsi. Veelgi varem võeti kasutusele leiutis *pinned photodiode* (joonis 9c), mille puhul hakati laenguid koguma pnp-struktuuri keskele ja mitte enam np-struktuuri pinnale. Vastav Jaapani teadlaste patent saadi 1980. aastal, kuid publikatsioon (Teranishi jt 1982) ilmus kaks aastat hiljem. Joonis 9a näitab nii iga piksli ette tekitatud miniatuurseid värvusfiltreid kui ka üldist IR-filtrit, mida saab elektromehaaniliselt kõrvaldada RGB-NIR-öörežiimi üleminekul. Öövaatlusrežiimis summeeritakse RGB-pikslite reaktsioonid ja tundlikkus muutub 1–2 dekaadi paremaks inimsilma tundlikkusest.

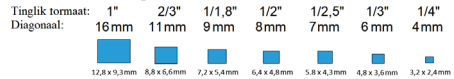
**a. Piksliteks jaotatud sensorkiibi funktsioneerimine**



**b. Tehniline progress väiksema piksli suunas**

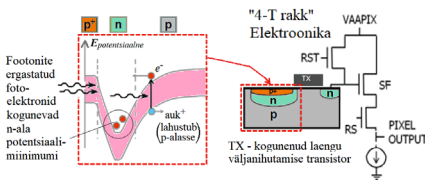


**d. Sensorkiipide mõõtmete vahemik**

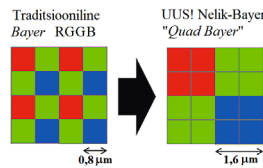


**c. Fotolaengu füüsika**

1980 Teranishi jt leiutis – maadud n-kihiga pnp-struktuur tavalise np-fotodiodi asemel



**e. Meetodid valgustuse diapasooni laiendamiseks väiksemate osapiksli abil**



**Joonis 9.** CMOS-maatriksphotosensorite tehnoloogia selgitused: a) värvifiltrite, laengukogumis- ja laengutötluselementide paigutus ränikiibil; b) tehnoloogilised edusammud pikslite mõõtmete vähendamiseks; c) fotoelektronide kogumise füüsika; d) sensorkiipide tüüpilised mõõtmed; e) värvifiltrite Bayeri tavakonfiguratsiooni edasiarenduse näide

Joonis 9b näitab pikslite mõõtmete vähendamisel tehtud edusamme firmade Sony ja Samsung eestvedamisel, mis tähendab liikumist kaadrisuuruse 48 MP suunas. On hinnatud, et arvutite protsessorikiipide juures saavutatud 20 nm suurusjärgu joonelaiuste järgi on varuks veel kümnekordne pikslite suuruse vähendamine. Valvekaamerate puhul võib aga pikslite vähendamisega kaasneda negatiivne efekt, nagu kaadrite liigsuured andmemahud ja vähenev elektronide arv ühele pikslile, mis suurendab müra ja ebatäpsust.

Pikslite mõõtmete vähendamisega kaasnev positiivne efekt:

- a) väga oluline eelis valvekaamerate jaoks on võimalus katta inimsilmast paremini pildidetallide valgustatuse väga laia dūnaamilist diapasooni (kaheksa dekaadi keskpäevapäikesest tähevalguseni) lühikesse ja pika säriajaga pikslite kombineerimise teel;
- b) paranevad elektroonilise suurenduse võimalused. Kallid mehaanilised PTZ-funktsiooniga (*Pan-Tilt-Zoom*) kaamerad on võimalik osaliselt asendada.

Joonis 9d näitab ühte võimalust, kuidas saab väiksemate osapikslite kooskasutamise puhul ühendada värvusfiltreid ja sellega vähendada tehnoloogiliste parameetrite kõikumise mõju. Märkusena võib lisada, et pikslite lateraalmõõtmete vähenemine (joonis 9b) on kaasa toonud pikslite pikkuse suurendamise tagasi 4–5 mikromeetri suunas (vt joonis 9a), et mitte kaotada elektronide arvu. Kokkuvõttes on RGB-NIR-sensorite tehnoloogia eesliinil toimumas järgmine areng:

- 1) fotokiipide osa otsene hübriidne seostamine videotöötluste arvutuskiipidega;
- 2) pikslite mõõtmete vähendamine;
- 3) sügavate külgisolatsiooni kanalite tekitamine (et vähendada naaber-pikslite mõju);
- 4) katsed mitte-Bayeri filtritega;
- 5) valgustugevuse dünaamilise diapasooni suurendamine 140 dB (7 dekaadi) suunas mitmesuguste osapikslite kombineerimise tehnoloogiate abil. Kasutatakse lühendit HDR (*High Dynamic Range*). Võrdluseks inimesilma valguskontrastide tajumise võime lühiajalise adapteerumise korral on ainult 4–5 dekaadi ehk ligikaudu 90 dB.

Maailma juhtfirmad sensorikiipide alal on Sony (Jaapan), Samsung (Lõuna-Korea), Omnivision (Hiina RV koos Taivani ja USA mõningase osalusega), STMicroelectronics (Prantsusmaa ja Itaalia) ja ON Semiconductor (USA).

## 5.2. Soojuskiirguskaamerad

Soojuskiirguskaamerad on RGB-NIR-kaameratest väga erinevad, sest elektromagnetkiirguse lainepikkused on kümme korda pikemad võrreldes VIS-NIR-i (nähtava valguse ja lähiiinfrapunakiirguse) diapasoonega (vt joonis 8). Lähiiinfrapunakiirguse NIR-diapasoone on pigem nähtava valguse laiendus, mida inimesil ei näe, kuid mida üldjuhul registreerivad väga hästi kõik ränist valmistatud masskasutuses fotosensorid, kui objektid on valgustatud lähiiinfrapunakiirguse allikatega, nagu näiteks hõõglambid või ka moodsates valvesüsteemides IR-prožektorid. Soojuskiirguse lainepikkuste piirkonnas 3–14 mikromeetrit (vt joonis 8) on aga kõik olendid, objektid ja ka vaatluskaamera enda detailid ruumi täitva kiirguse allikad. Termokaamerate põhimõtteline suur eelis VIS-NIR-diapasoone kaamerate ees ongi see, et nad ei



vaja eraldi valgusallikaid, vaid registreerivad vaadeldavate objektide endi kiirgust. Seetõttu võivad termokaamerad saada hakkama objektide avastamisega 10–100 korda väiksema pikslite arvuga võrreldes RGB-NIR-kaameratega ning piisavalt hea infrapunaoptika olemasolul jälgida militaarobjekte kümnete kilomeetrite kauguselt. Samas on suur probleem kõikjal leviva soojuskiirguse segavatest mõjudest vabanemine. Selle lahendamiseks on üldjoontes kaks võimalust:

- 1) jahutada sensorseade maha, mida tehakse MWIR-piirkonna kaameratega, mis kasutavad sensoris spetsiaalseid kitsa keelutsooniga pooljuhte;
- 2) proovida registreerida soojuskiirguse ruumilise jaotuse väikeseid erinevusi termotakisti tüüpi sensoritega (jahutust mittevajavad bolomeetriselised soojuskiirguskaamerad).

Soojuskaamerate teema puhul on olulised paar valemit, mis järelduvad üldtuntud Plancki musta keha soojuskiirguse teooriast. Kõik objektid, mille metallpinnad pole lihvitud või mis pole kaetud eriliste soojuskiirgust kahandavate pinnakatetega, kiirgavad ligikaudu selle teooria kohaselt. Esimene Plancki teooriast järelduv praktiline rakendusvalem on Wilhelm Wieneri domineeriva lainepikkuse nihkeseadus (pöördvõrdeline sõltuvus absoluutsest temperatuurist):

$$\lambda_{mac} = \frac{9,66 \mu\text{m}}{\left(\frac{T}{300\text{K}}\right)}. \quad (1)$$

Wieneri seadus (1) näitab, et toatemperatuuril  $T = 300\text{K} = 26,85 \text{ }^\circ\text{C}$  on keha soojuskiirguse tipp 10 mikromeetri lähedal ehk just LWIR-spektrilõigu keskel (vt joonis 8). Selline Plancki spekter, mis vastab ligikaudu inimese soojuskiirgusele, on esitatud allpool joonisel 10b. Valem (1) annab ka valvesüsteemide jaoks olulise järelduse: kuivõrd MWIR-spektridiapasoon 3–5 mikromeetrit vastab suhteliselt kõrgetele temperatuuridele  $T = 600 \div 1000\text{K} = 300 \div 700 \text{ }^\circ\text{C}$ , siis sobib MWIR pigem militaarsõidukite (kaug) seireks kui objektivalves kasutamiseks.

Teine kasulik järeldus Plancki teooriast on Josef Stefani ja Ludwig Boltzmanni musta keha kogukiirguse seadus, mis sätestab neljanda astme sõltuvuse temperatuurist. Praktiliseks kasutamiseks sobival normitud kujul näeb see seadus välja järgmiselt:

$$P = \left(459,3 \frac{W}{m^2}\right) \left(\frac{T}{300K}\right)^4. \quad (2)$$

Valemiga (2) kirjeldatud kogukiirguse neljanda astme sõltuvus temperatuurist võimendab kõiki vaateväljas jälgitavate objektide temperatuurierinevusi, mille registreerimisel põhineb termokaamerate töö. Lisaks toob valem (2) esile mõnevõrra üllatava fakti, et toatemperatuuride piirkonnas on kehade soojuskiirgus vägagi tugev, kuni 459 vatti pinna ruutmeetrilt. Tuleb aga arvestada, et see jaotub kiirgussuundade poolsfääri kõigi nurkade ja spektri lainepikkuste vahel ning on tasakaalustatud keskkonnast lähtuva teiste kehade vastukiirgusega.

Kokkuvõttes jagunevad soojuskiirguskaamerad üldjoontes kahte klassi (Lorrmann jt 2013; Barela jt 2017; Birch, Loo 2017).

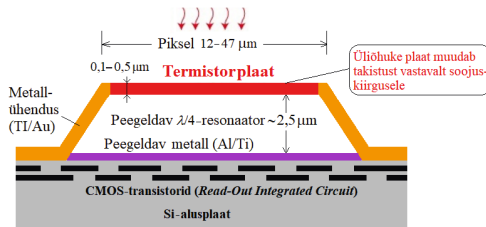
1. MWIR-diapasooni kuumade objektide militaarjälgimise kallid kaamerad, mille sensorid põhinevad kitsa keelutsooniga pooljuhtidel (InSb, InGaAs, HgCdTe jt) ja vajavad tugevat allajahutust isegi kuni vedela lämmastiku temperatuurideni 77 K. Seda tüüpi täpsete kaameratega, kasutades väga suuri, kuni 30 cm diameetriga erimaterjalidest läätsi (nt Ge, Si, ZnS, ZnSe), on võimalik detekteerida militaarsõidukeid isegi 55 km kauguselt (Ascedent 2022). Joonisel 8 on näidatud, et MWIR-diapasoon on ülikaugvaatluseks sobivam LWIR-diapasoonist, sest atmosfääri läbipaistvus on parem.
2. LWIR-diapasooni toatemperatuurilähedaste objektide jälgimise bolomeetrilised valvekaamerad termotakisti tüüpi sensoritega, mis ei vaja jahutust ning on seetõttu suhteliselt hinnasoodsad ja lihtsalt kasutatavad. On tehtud tööd ka nende odavamate kaamerate rakendamiseks MWIR-piirkonnas.

Bolomeetrilised kaamerad kasutavad spetsiaalseid kõrgtehnoloogilisi mikroelektromehaanilisi kiipe, mille pikslid kujutavad endast imeõhukesti (paksus 0,5 kuni 0,1 mikromeetrit) temperatuuritundlikust takistusmaterjalist mikroplaate, mille lateraal mõõtmed on vahemikus 50 kuni 12 mikromeetrit. Vastavate tööpõhimõtete täpsem selgitus on esitatud joonisel 10.

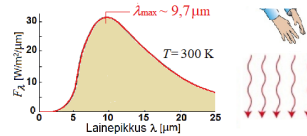
Joonise 10 kommenteerimiseks võib märkida, et mikrobolomeetrite tehnoloogia sai alguse 1990. aastate keskel (Lorrmann jt 2013). Võrreldes RGB-kaameratega ei ole pikslite arv suur, isegi kvaliteetkaamerate puhul (nt Boschi Dinion-seeria) domineerib pool-VGA 320 × 240 ja VGA 640 × 480

tehnoloogia pikslimõõduga 17 mikromeetrit. Ligikaudu kümme aastat tagasi sai võimalikuks ka üleminek 12 mikromeetri tehnoloogiale ning suurematele  $1024 \times 768$  ja  $1920 \times 1080$  kiipidele. Tagasihoidlik pikslite arv rahuldab tihti kasutajaid, kuna soojuskaamerad ei olegi valvetsüsteemides mõeldud isikute ja objektide täpseks identifitseerimiseks, vaid nende põhiülesanne on siiski häireolukordade esmane detekteerimine (avastamine). Bolomeetriliste kaamerate kaadrisagedus ei jää alla pooljuhtkaameratele ning ulatub tavaliselt kuni 30 ja isegi 60 kaadri sekundis.

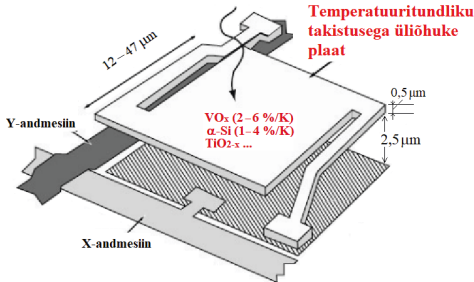
### a. Bolomeetrilise pikslitööpõhimõte



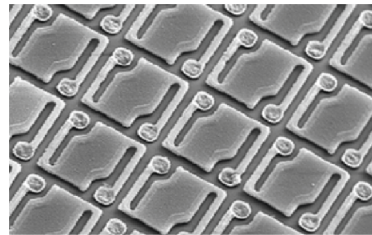
### b. Inimese soojuskiirguse spekter 10 μm piirkonnas (Planck)



### c. 3D-selgitus pikslile



### d. Näide reaalsest sensorkiibist


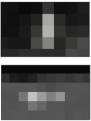

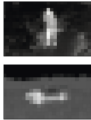






**Joonis 10.** Mikrobolomeetriliste soojuskaamerate tööpõhimõtete selgitus: a) skemaatiline läbilõige soojustundliku termistorplaadikesega pikslit; b) infrapunakiirguse LWIR-piirkonna keskele paigutuv toatemperatuurilähedaste objektide kiirgusspekter Plancki teooria järgi; c) bolomeetrilise pikslit 3D-esitus; d) realistlik sensorkiibi fragment.

Tänu mikrobolomeetrite tehnoloogia sissetöötamisele on turule jõudnud väga odavad amatöörkasutaja soojuskaamerad, mille hind on suurusjärgus 200–400 USA dollarit (nt Flir ONE LT  $80 \times 60$  ja Flir ONE PRO  $160 \times 120$ ). Üldiselt on sama avastamisvõimega soojuskaamerad siiski 4–7 korda kallimad RGB-kaameratest, mille üks põhjusi on, et kõik läätsed ja kaameraklaasid tuleb valmistada MWIR-LWIR-kiirgust läbilaskvatest kallitest erimaterjalidest (nt Ge, Si, ZnS, ZnSe).

### 5.3. DORI-astmestiku põhimõtted

Igasuguste valvekaamerate puhul on alati oluline, kui suurt pikslite arvu on vaja objektide esmaseks avastamiseks ning missugust juba nende objektide täpsemaks klassifitseerimiseks või kindlaks identifitseerimiseks. See küsimus kerkis USA sõjaväe uurimisasutustes juba 1950. aastate lõpus (Johnson 1958; Sjaaderma jt 2017), mil pandi paika esmane kolmeastmeline DRI-klassifikatsioon (*Detection-Recognition-Identification*). Hiljem, kui 2015. aastal hakkas kiiresti arenema tehisintellektipõhine näotuvastus (vt joonis 1), muutus kokkulepitud kriteeriumite vajadus veelgi olulisemaks. Siis kehtestati Euroopas oluline standard (EVS-EN 62676-4 2015), mis on praeguseni olnud aluseks neljaastmelisele DORI-süsteemile (*Detection-Observation-Recognition-Identification*). Joonisel 11 on kokku võetud DORI-astmestiku põhitõed ja soovituslik pikslite arv ning võrreldud seda DRI-astmestikuga termokaamerate jaoks.

		DORI-süsteem RGB-NIR-kaamerad EN-62676-4 (Euroopa 2015)	DRI-süsteem Soojuskiirguskaamerad Johnsoni kriteeriumid 1958 (USA jt)
AVASTAMINE	D – <i>detection</i> – detekteerimine  (objekti avastamine, liik inimene loom sõiduk ebaselge)	<b>25 ppm</b> (pikslit meetrile) Inimene ca 400 pikslit, sh näo laius ca 5–7 pikslit 	<b>D</b> TERMO ~2 ppm 3,5 x 1 = 3,5 pikslit! Inimene 3,5 x 1 = 3,5 pikslit! Sõiduk 2 x 2 = 4 pikslit! 
	O – <i>observation</i> – vaatlemine  (klassi eristamine, nt ohutu pahatahtlik või inimene loom sõiduk)	<b>62 ppm</b> Inimene ca 2500 pikslit, sh näo laius ca 15 pikslit 	<b>R</b> TERMO ≈ O <sub>RGB</sub> ~6 ppm 11 x 3 px Inimene 11 x 3 = 33 pikslit 6 x 6 px Sõiduk 6 x 6 = 36 pikslit 
TUVASTAMINE	R – <i>recognition</i> – äratundmine  (tuttava inimese/sõiduki äratundmine, auto numbrimärk ebaselge)	<b>125 ppm</b> Täpne identifitseerimine ebakindel 30 pikslit vahel 	<b>I</b> TERMO ≈ R <sub>RGB</sub> ~12 ppm 23 x 6 px 12 x 12 px Inimene 23 x 6 = 138 pikslit Sõiduk 12 x 12 = 144 pikslit 
	I – <i>identification</i> – identifitseerimine  (ka võõra isiku identifitseerimine, auto numbrimärgi määramine)	<b>250 ppm</b> 40-60-80 pikslit 	NB! Soojuskaameratel puudub identifitseerimise võimalus ja ajaloolistel põhjustel on DRI-süsteemis astmed nihutatud (õigem oleks kasutada nimetust DOR-süsteem). 

**Joonis 11.** Euroopa standardil EN-62676-4 põhineva DORI-astmestiku selgitus ja võrdlus varasema USA DRI-astmestikuga termokaamerate jaoks. Näidatud on soovitatav pikslite arv objekti meetri või terve objekti kohta. Joonis selgitab, miks objektide avastamise jaoks on termokaamera pikslid ligikaudu kümme korda väärtuslikumad, samuti seda, miks termokaamera ei võimalda siiski identifitseerimist DORI mõttes.

Joonisel 11 esitatud hinnang pikslite arvule (kas reaalse objekti meetri kohta või kokku objektile) annab orientiirid valvesüsteemide projekteerimiseks. DORI-süsteemi tundmine võimaldab valida kaameraid ja nende paigutust vastavalt ülesannetele, mida valvesüsteem peab lahendama. Näiteks on inimese identifitseerimiseks näo laiuse puhul soovitatav pikslite arv 60–80 ja auto numbrimärgi identifitseerimiseks soovitatav pikslite arv 100–150. Jooniselt 11 on näha, et samaväärsete väiksema täpsusega operatsioonide jaoks vajab termokaamera võrreldes RGB-NIR-kaameraga ligikaudu 10 korda vähem piksleid, kui võrrelda ühte lineaarmöödet, ja ligi 100 korda vähem piksleid, kui võrrelda kujutise pindala.

#### 5.4. Videoandmete mahu planeerimine

Amatöörfotograafide võib meeldida joonisel 9b märgitud kaadrisuurus 48 MP, aga sadade valvekaameratega süsteemide planeerija peab lähtuma realistlikust andmemahust, eriti kui videomaterjali on vaja veel teatud hulk päevi säilitada. Ökonoomse planeerimise korral pole mõtet ületada valvekeskuse kontrollekraanide pikslite arvu. Praktikas levinud ja soovitatav pikslite arv on 2 MP (nn Full HD 1920 x 1080). Kui hindame, et kolme värvi intensiivsuste kodeerimine vajab 3 baiti ja kaadrisagedus on 50 sekundis, siis saame ilma tihenduseta andmevoo sekundi ja ööpäeva kohta:

$$W = 2 \times 10^6 \times 24 \times 50 = 2400 \text{ Mbps} \approx 26 \text{ TB/ööp.} \quad (3)$$

Selline maht täidaks personaalarvuti mälu ühe tunniga ja suure professionaalse 1800 TB mälupanga kahe kuuga.

Kui praktikud hindavad, et kaamerate häälestamisel võiks olla vastuvõetav andmevoo diapason seisvatest ja väheliikuvatest kaadritest kuni rahuldava ning hea videoni vahemikus

50 kbps...1 Mbps...5 Mbps...20 Mbps,

oleksid vastavad andmete kokkupakkimise tegurid andmevoo maksimummahu puhul (3) järgmised:

48000...2400...480...120.

Järeldus on see, et praktikas on vaja ligikaudu tuhandekordset toorandmete kokkupakkimist. Selle saavutamiseks on tänapäeval kasutusel põhiliselt järgmised kolm algoritmi:

- 1) MJPEG – kõige nõrgem, aga nõuab vähem arvutusvõimsust, iga kaader tihendatakse eraldi järgmisest kaadrist;
- 2) H.264 – põhiline praegu kasutatav algoritm, ca kümme korda parem tihendus, keskmine arvutusvõimsus, edastab tugikaadreid ja vahepeal ainult muudatuste infot (Sullivan ja Wiegand 2005);
- 3) H.265 – veel ligi kaks korda parem, annab parema värvikvaliteedi, kuid vajab arvutusvõimsust.

## 6. Targad piirdetarad

Nagu rõhutatud sissejuhatuses ja illustreeritud joonisel 2, on piirdetara militaarobjektide valve peaaegu kohustuslik alamsüsteem, mis täidab nii seire- kui ka tõrjefunktsioone. Tänapäeval on perimeetri kaitsetarad üldjuhul targad ning varustatud helide, vibratsiooni ja/või liikumisanduritega ning elektrooniliste vaheplokkidega. See alamsüsteem peaks olema ühendatud koos kaameratega ühisesse multimodaalsesse valvesüsteemi (vt jooniseid 6 ja 7).

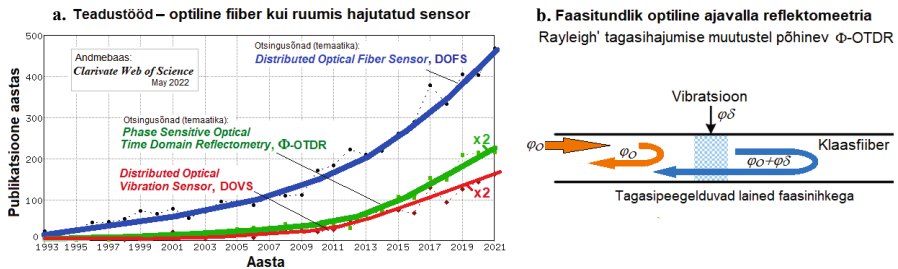
Üks tänapäevane näide on USA firma Southwest Microwave loodud kaitstesüsteem *Intrepid Micropoint II*, mille puhul on piirdetara külge paigutatud kaablid ja kuni 400-meetrise vahemaadega protsessorplokid, mis võimaldavad 1,1-meetrise täpsusega avastada ja positsioneerida vibratsiooniallikaid (Intrepid 2022). Tööpõhimõte baseerub ajavalla reflektomeetrial (*Time Domain Reflectometry*, TDR) ja signaalitöötlusel. Tagasipeegeldunud signaaliimpulsi hilistumisaeg määrab häiringu asukoha ja signaali kuju järgi saab teha järeldusi sündmuse iseloomu kohta. Süsteem on võimeline aru saama, kui tegu on vihma või üldise taustamüraga, ja väljastama alarm-signaali, kui mingis kindlas punktis toimus vibratsioone tekitav sündmus, näiteks aia ületamise või lõikamise katse.

Üldiselt liigub maailma teadushuvi selles suunas, et kasutada vaskaablite asemel fiiberoptilisi kaableid (Friedli jt 2019; Li jt 2021; Abdallah jt 2022). Võrreldes traditsiooniliste vaskaablitega on fiiberoptikal mitmeid eelised:

- pikkade vahemaade (kümned kilomeetrid, isegi 320 km) katmise võimalus (Liu jt 2016);
- äikesekindlus;

- väike sumbuvus (madal energiatarve aparatuurile);
- võimalus kasutada ühte optilist fiibrit mitmefunktsionaalse hajutatud sensorina;
- kaablite odavus.

Puuduseks võib olla optilise TDR-aparatuuri (OTDR-aparatuuri) keerukus ja hind, mida aga kompenseerib pikkade kaablilõikude seire võimalus. On võimalik asendada 200–400 m vahekaugusega väliskeskkonda paigutatud ja toidet vajavad kümned elektroonsed vaheplokid ühe kontrollseadmega fiiberkaabli otsas. Toetav võib siin olla fakt, et tsiviilsides on valguskaablid üldlevinud ning OTDR-aparatuuri kasutatakse ulatuslikult kaabliühenduste kontrolliks. Joonis 12 kinnitab fiiberoptiliste sensorite uuringute hulga kiiret kasvu.



**Joonis 12.** Fiiberoptiliste hajuspaigutusega sensorite areng: a) teadustööde hulga kasv ja b) selgitus populaarsust koguvale faasitundliku reflektomeetria meetodikale, mis registreerib peegelduvas valgusimpulssides ilmnevaid faasinihkeid. Joonisel toodud otsinguterminite tõlge:  $\Phi$ -OTDR – faasitundlik optiline ajavalla reflektomeetria; DOFS – ruumis hajutatud fiiberoptiline sensor; DOVS – ruumis hajutatud vibratsioonisensor

Joonise 12 täienduseks võib märkida, et nii vaskkaablitel kui ka optilistel fiiberkaablitel põhinevad süsteemid kasutavad signaaliimpulsside tagasipeegeldumise TDR-metoodikat, mis võimaldab hinnata häirete tekkimise asukohta ja häiringute iseloomu. Impulss levib nii vaskkaablis kui ka optilises fiibris ligikaudu 2/3 valguse kiirusega, kuid valguskaablis (täpsemalt lähiinfrapuna 1,5 mikromeetri lainepikkuspiirkonna optilises kaablis) on sumbuvus 2–3 suurusjärku väiksem, mis avab palju uusi võimalusi. Seejuures võimaldab valguskaabel üldse ja eriti ühemoodiline kitsa südamikuga valguskaabel palju täpsemaid mõõtemetodeid kui vaskkaabel. Peale selle pakuvad optilised fiibrid täppisreieks mitmeid lisavõimalusi, näiteks valgussignaali erinevate polarisatsioonide kasutamist. Kokkuvõttes on optilise kaabli meetodikate füüsikaline alus see, et ülihästi valgust juhtiv kaabel on

väga tundlik igasugustele mõjutustele, nagu painutus, surve ja vibratsioon, mis tekitavad testsignaali tagasipeegeldumisi ning muutusi peegeldunud signaalide parameetrites. Kõrvalehajumise, peegeldumise, lainepikkuse ning muude parameetrite muutuste füüsikalised alusmehhanismid on Rayleigh', Brillouini ja Ramani hajumismehhanismid (Allwood jt 2016).

Kokkuvõttes käib praegu intensiivne teadus- ja arendustöö fiiberoptiliste hajussensorite alal. Ilmselt läheneb hetk, mil klaasfiibripõhised pikamaasensorikaablid hakkavad perimeetrivalves välja vahetama traditsioonilisi vaskkaablitel põhinevaid süsteeme. Mõtlemapanev on fakt, et viimase viie aasta jooksul on Hiina Rahvavabariigi teaduspublikatsioonide osakaal tõusnud 50%-ni kogu maailmas avaldatust selles vallas. Väga oluline uus uurimisteema on tehisintellekti rakendamine häiringupõhjuste klassifitseerimiseks peegeldunud signaalides (Li jt 2021).

## 7. Droonivastased tehnoloogiad

Eespool on punktis 2 ja joonisel 3 näidatud, et mehitamata õhusõidukite (*Unmanned Aerial Vehicles*, UAV) ehk droonide tõrje on muutunud oluliseks teadusuuringute teemaks viimase kuue-seitsme aasta jooksul. Toetudes Ukraina sõja kogemustele, on selge, et droonide tähtsus kogu militaaralal on järsult suurenenud. Sõjanduse seisukohalt jagunevad droonid luure- ja ründedroonideks. Rahuaja objektivalve puhul tuleb valmistuda ebasoovitavate infot koguvate, vähem professionaalsete droonide avastamiseks ja tõrjumiseks.

Teaduskirjanduses käsitletakse põhiliselt viit tüüpi avastamismeetodeid: radarskaneerimine, raadioside skaneerimine, jälgimine nähtava valguse kaameratega, soojuskiirgussignatuuride ja helide seire (Park jt 2021; Lykou jt 2020; Shi jt 2018). Lisaks sellele on üksikud uurijad kaalunud ka lidareid (võib nimetada infrapunakiirguse radariteks), mille kohta on leitud, et detekteerida on mõnesaja meetri kauguselt võimalik, aga lahutusvõime ei võimalda objekte identifitseerida (Lykou jt 2020). Nimetatud viie põhilise tehnoloogia võrdlus on esitatud tabelis 2.

Tabelist 2 on näha, et igal tehnoloogial on nii eeliseid kui ka puudusi. Seetõttu ei ole töökindla lahenduse saavutamiseks üht kindlat sensoriseadmete tüüpi ja on vaja kasutada multimodaalset lähenemist ehk kombineerida vähemalt 2–3 meetodit (Park jt 2021; Lykou jt 2020). Põgus plusside ja miinuste kõrvutamine näitab siiski, et raadiosageduste skanner võib olla esmajärjekorras vajalik seade, mida segavad vähe ilmastikuolud ning vähemalt kahe sellise seadme abil on võimalik välja peilida nii enamlevinud droonide kui ka nende juhtijate asukohad (Rantelon 2022). Kui droon kasutab tuntud



sideprotokolle, suudab skanneri tarkvara ka selle mehitamata õhusõiduki tüübi identifitseerida. Lisaks sellele, et olla valmis raadiovaikuses iseseisvalt lendavaid droone avastama, on raadioskannerite toetuseks vaja ilmselt drooniradarit. See on samuti valgustusest ja ilmaoludest vähesõltuv sensor-seade, millel on kaugmaaseire võime.

**Tabel 2.** Droonide detekteerimise tehnoloogia võrdlus

Füüsikaline suurus	Sensorseade	Eelised	Miinused
Raadio-signaalid	Raadio-sageduste suuna-tundlikud skännerid*	<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ takistused ei sega</li> <li>▷ suur kaugus (3–50 km)</li> <li>▷ triangulatsioon (kui 2 tk)</li> <li>▷ drooni tüübi identifitseerimine paljudel juhtudel</li> <li>▷ droonijuhi lokaliseerimine</li> <li>▷ mõõdukas hind</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▼ ei avasta iseseisvalt lendavaid droone</li> <li>▼ piiratud sagedusvahemikud*</li> <li>▼ väga paljude droonide üheaegne jälgimine keerukas</li> </ul>
Raadio-impulsid	Radar*	<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ suur kaugus (1–20 km)</li> <li>▷ vähesõltuv ilmast</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▼ kõrge hind</li> <li>▼ takistused segavad</li> <li>▼ linnud eksitavad</li> </ul>
Valgus (+NIR)	RGB-NIR-kaamera	<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ suhteliselt odav</li> <li>▷ identifitseerimine võimalik</li> <li>▷ suhteliselt väike</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▼ vajab valgustust</li> <li>▼ ilmatundlik</li> <li>▼ takistused segavad</li> <li>▼ piiratud kaugused &lt; 0,5 km</li> </ul>
Soojus-kiirgus	Termo-kaamera	<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ suur kaugus (1–15 km)</li> <li>▷ vähesõltuv ilmast</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▼ halb resolutsioon, ei saa identifitseerida</li> </ul>
Heli	Mikrofoni-maatriksid	<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ miniatuurised realisatsioonid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▼ piiratud kaugus &lt; 0,2 km</li> <li>▼ väike täpsus, keerukas detekteerimine</li> </ul>

\* Sagedusdiapasoon vt jooniselt 8

Militaarobjektide droonivastaste meetmete planeerimisel on võimalik kasutada lennuväljade edukaid kogemusi. Kahjuks ei saa otseselt üle võtta heal tasemel omandatud meresadamate ja laevade kogemusi, kuna mereradarite puhul piisab horisontaalsest 2D-vaatest, aga droonide avastamiseks tuleb jälgida ka kõrgusmõdet ehk saavutada olukorratundlikkus kogu 3D-ruumist. Droonide ja lindude eristamine on kohane ülesanne tehisintellekti meetoditele (Rahman, Robertson 2020). Lindude ja droonide lennukäitumine on täiesti erinev, mida ei saa eristada üksiku kaadri järgi, vaid peab analüüsima liikumistrajektoore ning -dünaamikat.

## 8. Kokkuvõte

Artikkel esitab süsteemse lähenemise militaarobjektide valvesüsteemide olulistele küsimustele, käsitledes maailmas käivitunud kiireid tehnoloogia arengusuundi sensorseadmete, süsteemitehnika ja andmetehnoloogia vallas. Viidatud on uutele suundadele, mille poole tehnoloogia areng liigub ja mida saaks kasutusele võtta, et ajakohastada ja muuta tõhusamaks Eesti kaitseväge objektide valvesüsteeme. Lisaks insenerlikule konstruktiivsusele on materjali esituses taotletud pedagoogilisi eesmärgi, et artiklit saaks kasutada õppevahendina kursustel, kus käsitletakse info- ja kommunikatsioonitehnoloogia uusi suundi või valvesüsteemide ülesehitust.

Esitatud teadusstatistika analüüs näitab, et nelja tehnoloogilise alateema vallas (kaamerasüsteemide tehisintellekt, kaamerate arvutusvõimsus, droonitõrje ja fiiberoptilised sensorkaablid) algas ligikaudu 5–7 aastat tagasi kiire areng. Praktikast tähendab see seda, et mõne viimase aastaga on turule ilmunud uue põlvkonna sensorseadmed, mille puhul tarkvara osatähtsus on järsult suurenenud. Eesti kaitseväge peaks siin mõtlema uute sensorseadmete kasutuselevõtule sellise perspektiiviga, et valitud riistvara võimaldaks tarkvarapõhiseid edasiarendusi järgmise 7–10 aasta jooksul.

Võimalus parandada valvesüsteemide tõhusust ja vähendada inimeheto vajadust on seotud suurte multimodaalsete andmevoogude käsitlemise optimeeritud korraldusega, mille eesmärk ei ole taastoota toorandmeid, vaid tekitada kokkuvõtlik (agregeeritud) olukorrateadlikkuse pilt valvatavast objektist. Tänapäeval suudab paremate valvekaamerate tarkvara edukalt detekteerida muutusi ja klassifitseerida objekte. Edasi oleks andmete informatsiooniks ja teadmisteks muundamisel vaja liikuda multimodaalse sulandamise ja kõrgema taseme agregeerimise suunas, kasutades nii kogemus- (tehisnärvivõrgud) kui ka reeglipõhist (ekspertsüsteemid) tehisintellekti.

Kui kavandada militaarobjektide valvesüsteemide optimeerimist pikemas plaanis, ei pruugi praegune tsiviilobjektide valvet jälgendav suund olla piisavalt ettenägelik. On selge, et tulevikusõjad on kõrgtehnoloogilised, mille puhul näiteks luuredroonide võrgustik juhib automaatselt toimivat suure laskeulatusega suurtükiväge. Militaarobjektide valve peaks liikuma samas suunas, et tehniline varustus ja personali väljaõpe oleks ühildatav õppustel ja sõjalistel operatsioonidel kasutatavaga. Ühtlasi tähendavad need tulevikusuunad seda, et ohvitseride ja ajateenijate väljaõpe peab muutuma tehnoloogilisemaks ning Kaitseväge ja tehnikakõrgkoolide koostöö Eestis peab tugevnema.

## Kirjandus

- Abdallah, A.; Fouad, M. M.; Ahmed, H. N.** 2022. Low-cost real-time fiber optic sensor for intrusion detection. – *Sensor Review*, Vol. 41, No. 1, pp. 89–101.
- Abdelmoneem, R. M.; Shaaban, E.; Benslimane, A.** 2018. A Survey on Multi-Sensor Fusion Techniques in IoT for Healthcare. – *Proc. of 13<sup>th</sup> International Conference on Computer Engineering and Systems ICCES 2018 (Cairo, Egypt, December 18–19, 2018)*, pp. 157–162.
- Aceto, G.; Persico V.; Pescape, A.** 2019. A Survey on Information and Communication Technologies for Industry 4.0: State-of-the-Art, Taxonomies, Perspectives, and Challenges. – *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 21, No. 4, pp. 3467–3501.
- Ahmeda, E.; Yaqooba, I.; Hashem, I.; Khanb, I.; Ahmeda, A.; Imranc, M.; Vasilakos, A.** 2017. The role of big data analytics in Internet of Things. – *Computer Networks*, Vol. 126, pp. 459–471.
- Allwood, G.; Wild, G.; Hinckley, S.** 2016. Optical Fiber Sensors in Physical Intrusion Detection Systems: A Review. – *IEEE Sensors Journal*, Vol. 16, No. 14, pp. 5497–5509.
- Ascendent** 2022. Ascendent Technology Group (CAN) homepage. HD MWIR Cooled Thermal Surveillance 55km Night Vision Multi Sensor Gyro PTZ Camera System VPR-2050. [https://www.ascendentgroup.com/store/specs/372\(09.06.2022\)](https://www.ascendentgroup.com/store/specs/372(09.06.2022)).
- Atzori, L.; Iera, A.; Morabito, G.** 2010. The Internet of Things: A survey. – *Computer Networks*, Vol. 54, pp. 2787–2905.
- Barela, J.; Firmanty, K.; Kastek, M.; Krupinski, M.** 2017. Comparison of Parameters of Modern Cooled and Uncooled Thermal Imaging Cameras. – *Proceedings of SPIE*, Vol. 10433, 9 pages.
- Barela, J.; Firmanty, K.; Kastek, M.** 2021. Measurement and Analysis of the Parameters of Modern Long-Range Thermal Imaging Cameras. – *Sensors*, Vol. 21, No. 5700, 23 pages.
- Bigas, M.; Cabruja, E.; Forest, J.; Salvi, J.** 2006. Review of CMOS Image Sensors. – *Microelectronics Journal*, Vol. 37, pp. 433–451.
- Birch, G. C.; Loo, B. W.** 2017. Counter Unmanned Systems Testing: Evaluation of VIS, SWIR, MWIR and LWIR Passive Imagers. – *Sandia National Laboratories Report SAND2017-0921*, 32 pages. [https://www.osti.gov/servlets/purl/1342469\(27.05.2022\)](https://www.osti.gov/servlets/purl/1342469(27.05.2022)).
- Boyle, W. S.; Smith, G. E.** 1970. Charge Coupled Semiconductor Devices. – *Bell Syst. Tech. Journal*, Vol. 49, No. 4, pp. 587–593.
- Carin, L.; Geng, N.; McClure, M.; Sichina, J.; Nguyen, L.** 1999. Ultra-wide-band synthetic-aperture radar for mine-field detection. – *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 41, No. 1, pp. 18–33.

- Cisco Report** 2020. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (24.04.2022).
- Dennis, A.; Wixom, B. H.; Roth, R. M.** 2012. *Systems Analysis and Design*, the 5th Edition. John Wiley and Sons.
- Dong, S.; Wang, P.; Abbas, K.** 2021. A Survey on Deep Learning and its Applications. – *Computer Science Reviews*, Vol. 40, 100379, 40 pages.
- EVS-EN 62676-4.** 2015. Euroopa standard. Turvarakendustes kasutatavad videovalvesüsteemid. Osa 4: Rakendamise juhised. <https://www.evs.ee/et/evs-en-62676-4-2015> (15.05.2022).
- Fossum, E.** 1997. CMOS Image Sensors: Electronic Camera-On-A-Chip. – *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 44, No. 10, pp. 1689–1698.
- Fossum, E.; Hondongwa, D.** 2014. A Review of the Pinned Photodiode for CCD and CMOS Image Sensors. – *IEEE Journal of Electron Devices Society*, Vol. 2, No. 3, pp. 33–43.
- Frederici, J. F.; Shulkin, B.; Huang, F.; Gary, D.; Barat, R.; Oliveira, F.; Zimdars, D.** 2005. THz imaging and sensing for security applications – explosives, weapons and drugs. – *Semiconductor Science and Technology*, Vol. 20, No. 7, pp. S266–S280.
- Friedli, B.; Pizzetti, L.; Hauswirth, D.; Puzrin, A. M.** 2019. Ground-Buried Fiber-Optic Sensors for Object Identification. – *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 145, No. 2, 04018109, 13 pages.
- Infrared** 2023. Wikipedia the Free Encyclopedia. Infrared regions within the infrared by the sensor response division scheme. [https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared#Sensor\\_response\\_division\\_scheme](https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared#Sensor_response_division_scheme) (15.02.2023).
- Intrepid** 2022. Firma Southwest Microwave (USA) tarkade kaitsetarade uus põlvkond Intrepid Micropoint II. <https://www.southwestmicrowave.com/pdfs/MicroPoint-II-Data-Sheet-EN.pdf> (30.05.2022).
- Johnson, J.** 1958. Analysis of image forming systems. – *Proceedings of Image Intensifier Symposium* (Warfare Electrical Engineering Department, U.S. Army Research and Development Laboratories, Ft. Belvoir, VA, (October 5–7, 1958), pp. 244–273.
- Lee, E. A.** 2008. Cyber-Physical Systems: Design Challenges. – *Proceedings of 11<sup>th</sup> International IEEE Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing ISORC2008* (May 6, 2008, Orlando, FL, USA), pp. 363–369.
- Li, Y.; Wang, J.; Wang, P.; Bai, Q.; Gao, Y.; Zhang, H.; Jin, B.** 2021. Pattern Recognition for Distributed Optical Fiber Vibration Sensing: A Review. – *IEEE Sensors Journal*, Vol. 21, No. 10, pp. 11983–11998.
- Lidar** 2023. Wikipedia the Free Encyclopedia. Lidar (sometimes used terms light radar or photonic radar). <https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar> (15.02.2023).

- Liu, L.; Ouyang, W.; Wang, X.; Fieguth, P.; Chen, J.; Liu, X.; Pietikäinen, M.** 2020. Deep Learning for Generic Object Detection: A Survey. – *International Journal of Computer Vision*, Vol. 128, No. 2, pp. 261–318.
- Liu, X.; Jin, B.; Bai, Q.; Wang, Yu; Wang, D.; Wang, Y.** 2016. Distributed Fiber Optic Sensors for Vibration Detection. – *Sensors*, Vol. 16, No. 1164, 31 pages. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5017330/> (15.02.2023).
- Lohrmann, D.; Littleton, R.; Reese, C.; Murphy, D.; Vizgaitis, J.** 2013. Uncooled long-wave infrared small pixel focal plane array and system challenges. – *Optical Engineering*, Vol. 56, No. 2, 6 pages.
- Lu, C.; Tang, X.** 2015. Surpassing Human-Level Face Verification Performance on LFW with GaussianFace. – *Proceedings of the 29<sup>th</sup> Association for the Advancement of Artificial Intelligence Conference on Artificial Intelligence AAAI-15*, pp. 3811–3819.
- Luminous Efficacy** 2023. Human vision efficacy standards for photopic and scotopic vision. Hyperphysics homepage developed by Dr. Carl R. Nave in Department of Physics and Astronomy at Georgia State University (USA). <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/efficacy.html> (15.02.2023).
- Lykou, G.; Moustakas, D.; Gritzalis, D.** 2020. Defending Airport from UAS: A Survey on Cyber-Attacks and Counter-Drone Sensing Technology. – *Sensors*, Vol. 20, No. 3537, 40 pages.
- Norman, T.** 2014. *Integrated Security Systems Design*, the 2nd Edition. – Elsevier.
- Orztemel, E.; Gursev, S.** 2020. Literature Review of Industry 4.0 and Related Technologies. – *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 31, pp. 127–182.
- Park, S.; Kim, H. T.; Lee, S.; Joo, H.; Kim, H.** 2021. Survey on Anti-Drone Systems: Components, Designs, and Challenges. – *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 42635–42659.
- Rahman, S.; Robertson, D. A.** 2020. Classification of drones and birds using convolutional neural networks applied to radar micro-Doppler spectrogram images. – *IET Radar Sonar and Navigation*, Vol. 14, No. 5, pp. 653–661.
- Rantelon** 2022. Homepage of the Estonian high-tech company Rantelon. Drone detectors and jammers. <https://rantelon.ee/en/services/drone-detectors-and-jammers/> (06.12.2022).
- Reis, S. M.** 2019. Multi-scale and Multi-Granularity Process Analytics: A Review. – *Processes*, Vol. 7, No. 2, 21 pages.
- Rodenbeck, C. T.; Kim, S. G.; Tu, W. H.; Coutant, M. R.; Hong, S. P.; Li, M. Y.; Chang, K.** 2005. Ultra-wideband low-cost phased-array radars. – *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 53, No. 12, pp. 3967–3703.
- Ryan, P. J.; Watson, R. B.** 2017. Research Challenges for the Internet of Things: What Role Can OR Play? – *Systems*, Vol. 5, No. 1, 32 pages.
- Sarma, A. C.; Girao, J.** 2009. Identities in the Future Internet of Things. – *Wireless Personal Communication*, Vol. 49, pp. 353–363.
- Seng, J. K. P.; Ang, K. L. M.** 2019. Multimodal Emotion and Sentiment Modeling from Unstructured Big Data: Challenges, Architecture, and Techniques. – *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 90982–90998.

- Shi, X.; Yang, C.; Xie, W.; Liang, C.; Shi, Z.; Chen, J.** 2018. Anti-Drone System with Multiple Surveillance Technologies: Architecture, Implementation, and Challenges. – *IEEE Communications Magazine*, Vol. 56, No. 4, pp. 68–74.
- Silicon Absorption** 2023. Absorption depth of silicon. Photovoltaics homepage developed in Solar Power Lab at Arizona State University (USA). <https://www.pveducation.org/pvcdrom/materials/optical-properties-of-silicon> (15.02.2023).
- Siwiak, K.** 2001. Ultra-wide band radio: Introducing. – *Proceedings IEEE 53<sup>rd</sup> Vehicular Technology Conference VTC 2001* (Rhodes, Greece, May 6–9, 2001), pp. 1088–1093.
- Sjaaderma, T. A.; Smith, C. S.; Birch, G. C.** 2015. History and Evolution of the of Johnson Criteria. – *Sandia National Laboratories Report SAND2015-6368*, 40 pages. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1222446/> (30.05.2022).
- Subudhi, B. N.; Rout, D. K.; Ghosh, A.** 2019. Big data analytics for video surveillance. – *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 78, pp. 26129–26162.
- Sukhavasi, Susrutha; Sukhavasi Suprashya; Elleithy, K.; Abuzneid, S.; Elleithy, A.** 2021. CMOS Image Sensors in Surveillance System Applications. – *Sensors*, Vol. 21, No. 488, 50 pages. <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/2/488> (30.05.2022).
- Sullivan, G. J.; Wiegand, D.** 2005. Video Compression – From Concepts to the H.264/AVC Standard. – *IEEE Proceedings*, Vol. 93, No. 1, pp. 18–31.
- Teranishi, N.; Kohono, A.; Ishihara, Y.; Oda, E.; Arai, K.** 1982. No image lag photodiode structure in the interline CCD image sensor. – *Proceedings International Electron Devices Meeting IEDM 1982* (San Fransisco, CA, USA, December 13–15, 1982), pp. 324–327.
- Tilley, S.** 2020. *Systems Analysis and Design. The 12th Edition.* Cengage Learning. <https://cloudflare-ipfs.com/mwg-internal/de5fs23hu73ds/progress?id=DgN00GVOj19VbbeVvEP-LzBCpaeLGkaJOEWjAqnxHNE,&dl> (15.02.2023).
- US President's Council** 2007. *Leadership Under Challenge: Information Technology R&D in a Competitive World. An Assessment of the Federal Networking and Information Technology R&D Program.* August 2007. <https://www.nsf.gov/geo/geo-data-policies/pcast-nit-final.pdf> (13.04.2022).
- Ultra-wideband** 2023. Ultra-wideband radio technologies including radar. – *Wikipedia, the Free Encyclopedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-wideband> (15.02.2023).
- Vial, G.** 2019. Understanding Digital Transformation: a Review and a Research Agenda. – *Journal of Strategic Information Systems*, Vol. 28, pp. 118–144.
- Web of Science** 2022. <https://clarivate.com/webofsciencegroup/solutions/web-of-science/> (20.04.2022).
- Zhang, H.; Hong, X.** 2019. Recent Progresses on Object Detection: a Brief Review. – *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 78, No. 19, pp. 27809–27847.
- Zhang, W.; Tang, Y.; Shi, A.; Bao, L.; Shen, Y.; Shen, R.; Ye, Y.** 2018. Recent Developments in Spectroscopic Techniques for the Detection of Explosives. – *Materials*, Vol. 11, No. 8, Art. No. 1364, 24 pages.

Dr **ANDRES UDAL**

Tallinna Tehnikaülikooli tarkvarateaduse instituudi  
vanemteadur ja õppejõud

Leitnant (res) dr **JAANUS KAUGERAND**

Tallinna Tehnikaülikooli tarkvarateaduse instituudi teadur

Dr **RAUL SAVIMAA**

Tallinna Tehnikaülikooli tarkvarateaduse instituudi vanemteadur ja  
Sisekaitseakadeemia teadur

Dr **OLEV MÄRTENS**

Tallinna Tehnikaülikooli elektroonikainstituudi vanemteadur