

Elias Pulkkinen

KEVYET EMP-LAITTEET DRONEJEN TORJUNNASSA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Taneli Riihonen
Ohjaajat: Taneli Riihonen, Mikko Heino
Joulukuu 2023

TIIVISTELMÄ

Elias Pulkkinen: Kevyet EMP-laitteet dronejen torjunnassa
Lightweight EMP-devices for countering drones
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Joulukuu 2023

Kauko-ohjattavien lennokkien eli dronejen kustannusten laskiessa ja toiminnallisuuden parantuessa ne ovat yleistyneet nopeasti sotilaskäytössä. Sotateknologiaksi sovellettuina dronet voivat suorittaa esimerkiksi tiedustelutoimintaa, materiaalien kuljetusta tai räjähteiden toimittamista kohteisiinsa. Tämän seurauksena dronejen kustannustehokas torjunta on erittäin ajankohtainen tutkimuksen aihe monille valtioille. Eräs potentiaalinen torjuntakeino on sähkömagneettisen pulssin, eli EMP:n hyödyntäminen.

Tässä työssä selvitetään, kuinka tehokas puolustuskeino droneja vastaan voidaan luoda sijoittamalla kevyt EMP-laite dronen hyötykuormaksi ja laukaisemalla laite vihollisdronejen läheisyydessä. Laitteen luoman pulssin tulee olla tarpeeksi voimakas estääkseen dronejen toiminnan. Työssä selvitetiin aluksi EMP:n muodostumistapoja ja vaikutuksia elektroniikalle, jonka jälkeen esiteltiin käyttötarkoitukseen sopivan kevyen EMP-laitteen tekniikkaa. Lopuksi EMP-laitteen tehokkuutta puolustuskeinona arvioitiin vertaamalla sitä toiminnallisuudeltaan vastaavaan COMSED 2-laitteeseen.

Analyysistä selvisi, että riittävän voimakas EMP-laite dronejen torjuntaan on mahdollista rakentaa suhteellisen yksinkertaisesti yhdistämällä magneettisen pulssikompression, eli FCG:n ja vircatorin toiminnallisuus pulssin muodostamiseksi. Laitteen vaikutusalueeksi arvioitiin teoreettisesti lähteiden perusteella pallon muotoinen alue alle 5 metrin halkaisijalla käyttäen etäisyyden neliölakia. Tätä ei voitu kuitenkaan varmistaa COMSED:in puutteellisten teknisten tietojen ja toimintaetäisyyteen vaikuttavien muuttujien moninaisuuden takia. Pienen toimintasäteen lisäksi laitetta ei voida myöskään suunnitella tarpeeksi kevyeksi kustannustehokkaiden dronejen kannettavaksi, joten se vaatii jatkokehitystä puolustusratkaisun mahdollistamiseksi.

Avainsanat: sähkömagneettinen pulssi, drone, puolustusteollisuus, elektroniikka, sähkömagneettinen säteily

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SÄHKÖMAGNEETTISET PULSSIT	3
2.1 Muodostuminen	3
2.2 Ilmenemistavat	5
2.3 Seuraukset elektronikalle	8
2.4 EMP:ltä suojautuminen	11
3. KEVYEN EMP-LAITTEEN TEKNIikka	13
3.1 Dronejen kantokyky	13
3.2 Toimintaperiaate	14
3.3 Arvio laitteen painosta	17
4. VAIKUTUSTEN ARVIOINTI	19
4.1 Voimakkuuden arviointi	19
4.2 Vaikutusalueen arviointi	19
4.3 Kehitysmahdollisuudet	21
5. YHTEENVETO	22
LÄHTEET	23

1. JOHDANTO

Kauko-ohjattavien lennokkien eli dronejen kustannusten laskiessa ja toiminnallisuuden parantuessa ne ovat yleistyneet nopeasti niin kaupallisessa, kuin siviili- ja sotilaskäytössäkin. Sotateknologiaksi sovellettuina dronet voivat suorittaa esimerkiksi tiedustelutoimintaa, materiaalien kuljetusta tai räjähteiden toimittamista kohteisiinsa. Euroopan heikentyneen turvallisuustilanteen vuoksi Suomessakin on näin ollen lähivuosina noussut ajankohtaiseksi aiheeksi dronejen kustannustehokas torjunta. Eräs potentiaalinen torjuntakeino on sähkömagneettisten pulssien (engl. electromagnetic pulse, EMP) hyödyntäminen.

EMP on lyhytkestoinen purkaus sähkömagneettista energiaa, joka joutuessaan kosketuksiin elektroniikan kanssa mahdollisesti vaurioittaa sitä tai häiritsee sen toimintaa. EMP voi syntyä luonnollisesti tai keinotekoisesti, ja sen energia siirtyy neljällä eri tavalla: sähkö- tai magneettikentän aaltolina, sähkömagneettisena säteilynä tai sähköisesti johtamalla. Pulssia kuvataan sen ominaisuuksien, kuten energian siirtotavan, taajuusspektrin ja pulssin aaltomuodon avulla. Erilaisia EMP-tyyppejä on monia johtuen vaihtelusta niiden syntytavassa ja vaikutuksissa. Näitä ovat esimerkiksi luonnollisiin sähkömagneettisiin pulsseihin kuuluvat salamointi ja sähköstaattinen purkaus (engl. electrostatic discharge, ESD) sekä keinotekoisista tapahtumista, kuten sähkölinjan ylijännitepiikeistä tai ydinräjähdyksestä (engl. nuclear EMP, NEMP) johtuvat pulssit. [1]

Työn tarkoitus on selvittää teoreettisesta näkökulmasta, kuinka tehokas puolustuskeino droneja vastaan olisi mahdollista luoda hyödyntämällä kevyttä EMP-laitetta yhdistettynä sitä kuljettavaan droneen. Lisäksi tutkitaan erityisesti EMP:n luomista, sen vaikutuksia elektroniikkaan ja siltä suojautumista sekä arvioidaan, voidaanko laitetta käyttää ilman, että sitä kantava drone hajoaa. Tässä työssä keskitytään kevyisiin, aseteknologiana hyödynnettyihin NNEMP:hin (engl. non-nuclear EMP), joissa ei käytetä ydinräjähdystä. Tämänkaltaisen kevyt EMP-laite määritellään työn jatkoa koskien laitteeksi, joka on fyysisiltä ominaisuuksiltaan tarpeeksi pieni dronen kuljettavaksi ja jonka toiminnallinen pää-tarkoitus on häiritä elektroniikan toimintaa dronejen järjestelmissä. Painoltaan kevyt EMP-laite on rajattu kolmeen luokkaan: alle 1,5 kg, 1,5–5,5 kg tai yli 5,5 kg.

Työssä tehdyn analyysin tuloksena selvisi, että teoriassa kahden, toimintaperiaatteen yksinkertaisen laitteen avulla voidaan luoda tarpeeksi vahva EMP dronejen toiminnan estämiseksi. Pulssi muodostetaan aluksi magneettisen pulssikompression (engl. flux compression generator, FCG) avulla, jonka jälkeen se muokataan ominaisuuksiltaan käyttökohteen kannalta tehokkaammaksi vircatoria hyödyntämällä [1]. Tällä tavoin tuotetun EMP:n ominaisuuksia arvioitiin työssä Texasin yliopistossa rakennetun COMSED 2-nimisen EMP-laitteen ominaisuuksien [2] ja etäisyyden neliölain avulla. Arvion mukaan luodun pulssin vaikutusalue on vain noin 4,6 m halkaisijaltaan oleva pallon muotoinen alue, joka tekee tällaisesta kevyestä EMP-laitteesta tehottoman torjuntakeinon. Lisäksi laitteen paino on arvion mukaan huomattavasti liian suuri kustannustehokkaan dronen hyötykuormaksi. Näin ollen kevyet EMP-laitteet vaativat jatkokehitystä ennen kuin esitetty puolustusratkaisu on realistinen vaihtoehto.

Tässä työssä perehdytään sähkömagneettisten pulssien ominaisuuksiin ja analysoidaan, voidaanko niitä hyödyntää esitetyssä maanpuolustusratkaisussa droneja vastaan. Luvussa 2 esitellään yleisesti EMP:tä ilmiönä ja sen ominaisuuksia, joista tärkein työn kannalta on sen tuhoava vaikutus elektroniikalle. Luvussa 3 määritellään aluksi puolustusratkaisussa käytettävä kevyt EMP-laite ja perustellaan sen rajauksia. Tämän jälkeen arvioidaan, voidaanko tästä teoreettisesta EMP-laitteesta rakentaa tarpeeksi kevyt dronen kannettavaksi. Luvussa 4 arvioidaan kuinka tehokas teoreettinen laite olisi käytännössä sen voimakkuuden sekä vaikutusalueen perusteella ja kuinka sitä voitaisiin jatkokehittää. Viimeisenä luvussa 5 esitetään yhteenveto työstä.

2. SÄHKÖMAGNEETTISET PULSSIT

Sähkömagneettiset pulssit eli EMP:t ovat lyhytkestoisia purkauksia sähkömagneettista energiaa. Nämä pulssit voivat syntyä monin eri tavoin, ja niiden vaikutukset elektroniselle ympäristölleen vaihtelevat useiden parametrien perusteella. Tässä luvussa esitellään EMP:n erilaisia muodostumis- ja ilmenemistapoja, sen vaikutuksia elektroniikalle ja suo- jautumistapoja sitä vastaan.

2.1 Muodostuminen

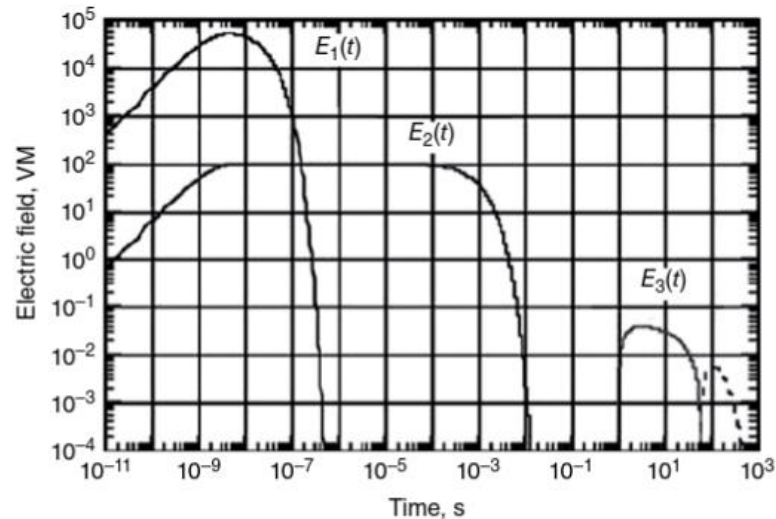
Sähkömagneettinen pulssi syntyy, kun kiihtyvässä liikkeessä oleva varattu hiukkanen emittoi sähkömagneettista säteilyä. EMP:t voidaan jakaa karkeasti luonnollisiin ja keino- tekoiisiin muodostumistapansa perusteella. Luonnollisiin pulsseihin kuuluu salamoin- nista johtuva EMP (engl. lightning EMP, LEMP), jossa pilven staattinen sähkövaraus purkautuu ilman kautta maahan salamaniskuna. Tämä sähköpurkaus voi vapauttaa jopa 0,2–2,1 gigajoulen verran energiaa [3] ja aiheuttaa voimakkaan sähkökentän iskukohdan lähistölle, jonka vaikutukset elektroniikalle ovat tuhoisia [4]. LEMP:lle on ominaista pää- pulssia edeltävä matalaenerginen sähköpurkaus ja suuret jännite-erot sekä sähkövirrat. Salamaniskun EMP-vaikutuksia vastaan osataan nykyään kuitenkin suojautua tehok- kaasti esimerkiksi lentokoneiden ja infrastruktuurin suunnittelussa.

Toinen luonnollinen EMP-tyyppi on sähköstaattinen purkaus, jossa kahden varautuneen kappaleen välinen varausero purkautuu joko suoran kosketuksen tai väliaineen kautta. Edellä mainittu salamanisku on esimerkki sähköstaattisesta purkauksesta, mutta nykyi- sin merkittävin ESD-tyyppi on pienikokoisemmat, elektroniikkatuotannossa tapahtuvat komponentteja vaurioittavat purkaukset. Yleinen esimerkki tällaisesta purkauksesta on tilanne, jossa työntekijällä on staattinen varaus vaatteiden hankaamisen seurauksena. Tällöin työntekijän käsitellessä työstettävää laitetta varaus purkautuu siihen tehden va- hinkoa sen komponenteille. Erityisesti puolijohdekomponentit ovat alttiita vikaantumaan ESD:n korkeajännitteisen purkauksen seurauksena [1], eikä niiden vaurioitumista välttä- mättä huomaa ulospäin. Tämän takia tuotantolaitoksissa työpisteet on usein maadoitettu epätoivottujen potentiaalierojen syntymisen estämiseksi. ESD:n riskiä voidaan vähentää lisäksi esimerkiksi työntekijöiden henkilökohtaisella suojauksella, joka koostuu ESD-ken- gistä, -rannekkeesta ja -vaatetuksesta.

Keinotekoinen EMP voi syntyä ihmisten toiminnan sivutuotteena tahattomasti, tai se voidaan tuottaa tarkoituksellisesti. Ei-toivottu EMP-ilmiö voi olla esimerkiksi sähköpiirin kytkentäpulsseista johtuvat sähkömagneettiset häiriöt. Piirin nopeasti muuttaessa sähkövirtaa johtimissaan ja komponenteissaan se aiheuttaa ympärilleen sähkömagneettista säteilyä, joka on amplitudiltaan pientä ja ilmenee läheisissä piireissä häiriönä. Kytkeäpulsit liittyvät sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen (engl. electromagnetic compatibility, EMC), joka kuvaa elektronisen järjestelmän toimintaa sen sähkömagneettisessa ympäristössä. EMC:n tavoitteena on järjestelmän aiheuttamien ja vastaanottamien häiriöiden vaikutusten minimointi. Näiden tavoitteiden tukena on olemassa kansainvälisiä EMC-standardeja, kuten IEC:n (International Electrotechnical Commission) 61000-sarjaan kuuluvat standardit [5].

Tarkoituksellisesti luotua EMP:tä vuorostaan käytetään usein aseteknologiana, kuten ydinräjähdyksestä syntyvää NEMP:tä, joka on aiemmin esitettyjä EMP-tyyppisiä vahvempi sähkömagneettinen pulssi. Yksinkertaistettuna NEMP muodostuu, kun ydinräjähdyksestä syntyvä gammasäteily irrottaa ympäröivästä väliaineesta elektroneja ja antaa niille liike-energiaa. Tämän seurauksena elektronit kulkeutuvat pois päin räjähdyksestä jättäen sen ympärille pallon muotoisen, positiivisesti varautuneen sisäkuoren. Elektronien sinkouduttua keskimääräisen etäisyyden päähän ne muodostavat negatiivisesti varautuneen ulkokuoren ja ovat näin luoneet voimakkaan sähkökentän sisä- ja ulkokuoren välille. Syntynyt sähkökenttä saa negatiivisesti varautuneen ulkokuoren kiihtyvään liikkeeseen takaisin kohti sisäkuorta, jolloin elektronien liike synnyttää vahvan sähkömagneettisen pulssin. [6]

Ydinräjähdysten tapahtuessa ilmakehän yläosassa tai sen ulkopuolella, kyseessä on NEMP:n erikoistapaus HEMP (engl. high altitude EMP). Tällöin ympäröivän väliaineen ollessa ohuempaa elektronit sinkoutuvat räjähdysten jälkeen kauemmas sisäkuoresta, jonka seurauksena kasvanut liikehdintä synnyttää vahvemman EMP:n. IEC:n määritelmän mukaan HEMP:n muodostuu kolmesta komponentista: E_1 , E_2 ja E_3 [6, ks. 7]. Komponenttien parametreissa on eroja (kuva 1) ja niitä voidaan kuvata erillisinä pulsseina.



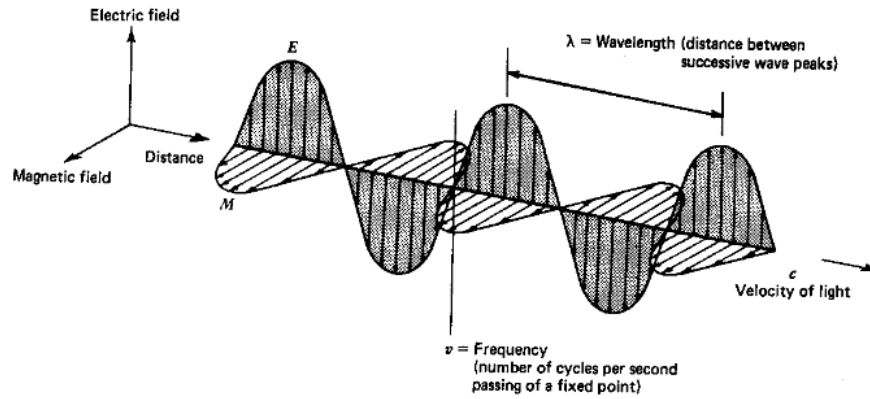
Kuva 1. HEMP:n komponenttien aaltomuodot [6, ks. 7].

Voimakkain ja lyhytkestoisin komponentti on E_1 , joka syntyy ydinräjähdyksessä aiemmin kuvatulla tavalla. Maan magneettikenttä ohjaa pulssin energiaa kohti maanpintaa pinta-alalle, joka määräytyy räjähdyskorkeuden perusteella. E_1 :n vahvuuden takia se aiheuttaa komponenteista eniten vahinkoa elektroniikalle hajottaen jopa useita erilaisia ylijännitesuojaelementtejä [7]. E_2 on vahvuutensa ja kestoensa perusteella keskimääräinen kolmesta komponentista ja sen EMP-vaikutukset ovat verrattavissa salamaniskuun [4]. Tämän yhteneväisyyden takia E_2 ei yksin ole suuri uhka elektroniikalle LEMP-suojatoimien ansiosta, mutta edeltävän E_1 pulssin hajottaessa nämä suojatoimet voivat E_2 :n vaikutukset olla vahingollisia. E_3 on HEMP:n viimeinen ja heikoin pulssi, joka syntyy Maan magneettikentän häiriintymisestä räjähdyksessä ja palautumisesta normaalitilaansa [7]. Tämä komponentti on verrattavissa auringonpurkaukseen.

Sotilaskäyttöön tarkoitettu EMP voidaan synnyttää myös ilman ydinräjähdystä sitä varten rakennetulla laitteella. Tässä työssä syvennyttään myöhemmissä luvuissa tämänkaltaisen kevyen EMP-laitteen toimintaan ja vaikutuksiin.

2.2 Ilmenemistavat

EMP ilmenee sähkömagneettisena säteilynä, joka on sähkö- ja magneettikentän poikittaista aaltoliikettä (kuva 2). Säteily perustuu Maxwellin yhtälöiden kuvaamaan ilmiöön, jossa muuttuva sähkökenttä synnyttää magneettikentän ja toisaalta muuttuva magneettikenttä sähkökentän. [9] Lähteenä säteilylle toimii varattujen hiukkasten liike, kuten aiemmin kuvatussa NEMP:n tapauksessa elektronien sinkoutuessa takaisin räjähdyskapselin sisäkuorelle.



Kuva 2. Sähkömagneettisen säteilyn eteneminen [10].

Sähkömagneettinen säteily siirtää EMP:n energiaa sähkö- ja magneettikenttien värähtelynä ja etenee tyhjiössä valon nopeudella. Säteilyn etenemisnopeus c , aallonpituus ja taajuus liittyvät toisiinsa tiiviisti aaltoliikkeen perusyhtälön kautta

$$c = \lambda f, \quad (1)$$

missä λ on aallonpituus ja f on taajuus. Nämä ominaisuudet kuvaavat säteilyn tyyppiä ja sen sijoittumista sähkömagneettisen säteilyn spektrille. EMP:n spektri viittaa tietyn pulssein sisältämiin taajuuksiin, jotka rajoittuvat pääosin radio- ja mikroaaltoihin. NEMP:n energia esimerkiksi jakautuu 100 kHz–10 MHz taajuuksille [9].

Sähkömagneettisen pulssin edetessä palloaaltona voidaan sen vaimenemista mallintaa Friisin kaavan avulla [11]. Aluksi kuvataan lähetetyn tehon jakaantumista palloaallon pinta-alalle tehotiheyden kaavalla

$$P_d = \frac{P_T}{4\pi R^2}, \quad (2)$$

jossa P_T on lähetettävään antenniin syötetty teho ja R on antennien etäisyys toisistaan. Ottamalla kaavassa huomioon lähetettävän antennin vahvistus ja vastaanottavan antennin kyky vastaanottaa sähkömagneettista säteilyä, saadaan se muotoon

$$P_R = \frac{P_T}{4\pi R^2} G_T A_{ER}, \quad (3)$$

jossa P_R on vastaanotettu teho, G_T on lähetettävän antennin antennivahvistus ja A_{ER} on vastaanottavan antennin sieppauspinta-ala (engl. effective aperture).

Sieppauspinta-ala antennille saadaan yleisesti laskettua kaavalla

$$A_E = \frac{G\lambda^2}{4\pi}, \quad (4)$$

jossa G on antennin antennivahvistus ja λ on sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus. Yhdistämällä yhtälöt (3) ja (4) saadaan vastaanotettua tehoa kuvaava Friisin kaava

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi R)^2}, \quad (5)$$

joka voidaan yhtälön (1) mukaisesti myös esittää sähkömagneettisen säteilyn taajuuden avulla

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R c^2}{(4\pi R f)^2}. \quad (6)$$

Yhtälön (2) tuloksena saatavaa tehotehiyyttä hyödyntäen voidaan lisäksi laskea sähkömagneettisen säteilyn kenttien voimakkuudet. Maxwellin yhtälöistä voidaan johtaa sähkö- ja magneettikentän välille yhteys

$$\frac{E}{H} = \eta_0 = 120\pi \Omega, \quad (7)$$

jossa E on sähkökentän voimakkuus, H on magneettikentän voimakkuus ja η_0 on vapaan tilan impedanssi (engl. impedance of free space) [11]. Tehotehiyden kuvatessa energiansiirtoa per pinta-alayksikkö, voidaan se kuvata sähkö- ja magneettikentän voimakkuuksien tulona

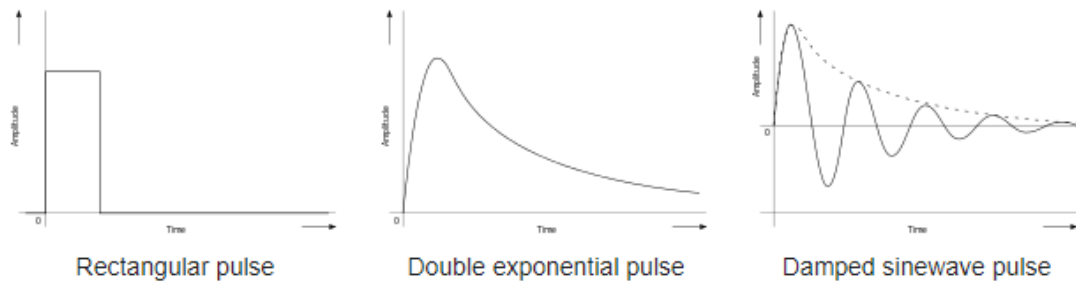
$$P_d = EH. \quad (8)$$

Yhdistämällä yhtälöt (7) ja (8) saadaan sähkömagneettisen pulssin aiheuttaman sähkökentän voimakkuus laskettua tehotehiyden avulla kaavalla

$$E = \sqrt{P_d \eta_0}. \quad (9)$$

EMP:n karakteristisiin ominaisuuksiin kuuluu lisäksi sen aaltomuoto. Aaltomuoto kuvaa kuinka nopeasti EMP:n synnyttämän sähkömagneettisen kentän arvo muuttuu, mutta reaalisten pulssien monimutkaisuuden takia niitä kuvataan usein erilaisilla malleilla. Yleisiä malleja ovat esimerkiksi digitaalisen piirin toiminnasta johtuva suorakulmainen pulssi ja kaksinkertainen eksponentiaalinen käyrä. Näistä jälkimmäistä voidaan muokata realistisemmaksi muuntamalla se vaimenevaksi siniaalloksi, jonka amplitudi lähenee nollaa

ajan funktiona. Näiden mallien (kuva 3) sijasta voidaan myös käyttää yleisille EMP-tyypeille laskettuja ja mitattuja aaltomuotoja, jotka ilmaisevat pulssien nousu- ja laskuajat.



Kuva 3. Yleisiä aaltomalleja [12].

Aaltomuodon kuvaajasta on usein myös luettavissa pulssin kesto ja amplitudi. EMP:n vahvuutta mitataan usein sen luoman sähkökentän perusteella (volttia metriä kohti, V/m), jota amplitudi ilmaisee. Täten pulssin amplitudi on merkittävimpiä EMP:n ominaisuuksia sen vaikuttaessa suoraan EMP:n kykyyn vahingoittaa elektroniikkaa. HEMP:n komponenttien aiheuttamat sähkökentät ovat esimerkiksi kokoluokiltaan noin 50 000 V/m (E_1), 100 V/m (E_2) ja 0,05 V/m (E_3) [11, ks. 7].

2.3 Seuraukset elektroniikalle

Teknologian ja elektroniikan kehittyminen on osaltaan vaikuttanut negatiivisesti komponenttien kykyyn sietää ulkopuolisia häiriöitä, kuten sähkömagneettista säteilyä. Kehityksen suuntana on ollut jo vuosikymmeniä pienentää komponenttien kokoa ja mahdollistaa niitä suurempi määrä piirin pinta-alalle Mooren lain mukaisesti [14]. Tämän seurauksena komponenteissa käytettävät, alati pienevät johtimet ja käyttöjännitteet ovat herkempiä ulkopuolisille, suhteessa kasvaville jännitteille ja virroille. Sähkömagneettisen pulssin kytkeytyessä (engl. coupling) elektroniseen piiriin tai komponenttiin se voi aiheuttaa järjestelmän toimintakyvyn heikkenemistä, epätoivottua käyttäytymistä tai hajoamisen. Varsinkin virheellistä käyttäytymistä voi olla vaikea huomata järjestelmän toiminnasta, jolloin siitä aiheutuvat kustannukset kasvavat ajan kuluessa.

EMP:n aiheuttama vahinko elektroniikalle määräytyy järjestelmään siirtyneen energiamäärän perusteella. Aihetta käsittelevässä kirjallisuudessa tunnistetaan kaksi yleistä indusoitumiseen perustuvaa energiansiirtomekanismia, eli kytkeytymistapaa: front door coupling (FDC) ja back door coupling (BDC). FDC vaikuttaa radiolaitteisiin sähkömagneettisen pulssin kytkeytyessä kohdejärjestelmän antenniin, joka on suunniteltu kuljetamaan tehoa järjestelmän ja ympäristön välillä. Täten antenni toimii otollisena polkuna

siirtämään pulssin energiaa järjestelmän muihin osiin. BDC:ssä sähkömagneettinen pulssi kytkeytyy suojaamattoman kohdejärjestelmän elementtien välisiin kaapeleihin ja johtimiin.

EMP:n pääkohde elektroniikassa on sen puolijohdekomponentit [15], jotka pyritään vikaannuttamaan aiheuttamalla niihin suuria jännite- ja virtapiikkejä. Puolijohdeista valmistettuja transistoreita on hyödynnetty lähestulkoon kaikessa nykyaikaisessa elektroniikassa ja niiden kaksi yleisintä tyyppiä on BJT:t (engl. bipolar junction transistor) ja FET:it (engl. field effect transistor). BJT:n vikaantuminen tapahtuu sen puolijohdeliitosten yli olevan jännitteen kasvaessa liian suureksi. Tällöin jännitteen luoma sähkökenttä irrottaa varauksenkuljettajia metalliseoksesta, aiheuttaen vyörypurkauksen (engl. avalanche). FET-tyyppisten transistorien pääasiallinen vikaantumismekanismi puolestaan on ylijännitteen aiheuttama läpilyönti niiden hilaeristeessä. Molemmissa transistorityypeissä voi epätoivotun sähkövirran seurauksena esiintyä myös lämmön aiheuttamia fyysisiä vaurioita. [16] Mikropiireissä voi EMP:n seurauksena esiintyä lisäksi valokaari kahden lähekkäisen johtimen välillä tai latch-up-ilmiö, joka aiheuttaa oikosulun. Tällöin piirin transistorit luovat matalaimpedanssisen polun virralle käyttöjännitteestä maahan, laukaisten eräänlaisen loisirakenteen. Tässä tyristoriin verrattavassa loisirakenteessa transistorit johtavat jatkuvasti virtaa ja tarkoitettu toimintatila saadaan palautettua vasta sulkemalla piirin virransyöttö. [17]

Transistorien vikaantumiseen vaadittava jännite vaihtelee transistorin tyyppin, käytetyn konfiguraation ja vaikutettujen terminaalien perusteella. Näin ollen on mahdollista esittää EMP:n aiheuttamien jännitteiden tasoja, jotka riittävät vaikuttamaan tietyissä tilanteissa epätoivotusti transistorin toimintaan (taulukko 1). Alinta jänniterajaa voidaan usein ajatella merkityksellisimpänä, sillä se on pienin jännitetaso, jolla transistorin toiminta vaarantuu. Mainittakoon, että MOSFET:eillä on olemassa alhainen (n. 2 V) ohjausjänniteraja, jolla ne alkavat johtamaan sähköä. Tämä ei vahingoita transistoria, mutta sillä voi olla epätoivottuja vaikutuksia kohdesysteemin toimintaan.

Taulukko 1. Yleisten transistorityyppien vikaantumisjännitetasoja [17–20].

Transistori	Jännite-ero terminaalien yli (V)					
	Emitteri-Kanta (V_{EE})	Kollektori-Emitteri (V_{CE})	Kollektori-Kanta (V_{CB})	Hila-Lähde (V_{GS})	Nielu-Lähde (V_{DS})	Nielu-Hila (V_{DG})
BD139 (BJT)	5	80	100	-	-	-
S8550 (BJT)	6	25	40	-	-	-
BS170 (MOS-FET)	-	-	-	20	60	60
2N7000 (MOS-FET)	-	-	-	40	60	60

EMP:n aiheuttaman häiriöjännitteen suuruutta kohdelaitteessa voidaan arvioida sähkömagnetismin perusyhtälöihin kuuluvan Faradayn induktiolain avulla. Sen mukaan johdin-silmukkaan indusoituva lähdejännite saadaan laskettua kaavalla

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}, \quad (10)$$

jossa Φ_B on määritellyn alan läpäisevä magneettivuon ja negatiivinen etumerkki ilmaisee indusoituvan jännitteen pyrkivän vastustamaan magneettivuon muutosta Lenzin lain mukaisesti. Magneettivuon voidaan ilmaista magneettivuon tiheyden ja sen läpäisemän alan avulla. Kyseiseen alaan vaikuttaa vuorostaan sen suuntaus magneettikentän suhteen ja kelan tapauksessa sen kierrosluku, jolloin Faradayn induktiolaki saadaan kasvavan magneettikentän tapauksessa muotoon

$$\varepsilon = -N \frac{dB}{dt} A \cos(\theta), \quad (11)$$

jossa N on kelan kierrosluku, B on magneettivuon tiheys, A on läpäistävä ala ja θ on alan normaalin ja magneettivuon suunnan välinen kulma. Ulkoisen sähkökentän aiheuttama virrantiheys johtimessa saadaan laskettua kaavalla

$$J = \frac{E}{\sigma}, \quad (12)$$

jossa σ on johtimen johtavuus [22]. Korvaamalla johtavuus sen käänteisluureella resistiivisyydellä ρ , saadaan yhtälö (12) muotoon

$$J = E\rho. \quad (13)$$

Virrantiheys voidaan lisäksi ilmaista määritelmänsä mukaisesti kaavalla

$$J = \frac{I}{A}, \quad (14)$$

jossa I on virta johtimessa ja A on sen poikkipinta-ala. Yhtälöt (13) ja (14) yhdistämällä voidaan EMP:n sähkökentän aiheuttamaa virtaa johtimessa täten arvioida kaavalla

$$I = EA\rho. \quad (15)$$

2.4 EMP:ltä suojautuminen

EMP:ltä suojautumista voidaan pitää osana aiemmin esiteltyä sähkömagneettisen yhteensopivuuden suunnittelua. Laitteella voi täten olla jo suunnitteluvaiheessa toteutettuja torjuntakeinoja sähkömagneettista säteilyä vastaan, mutta EMP:n ollessa tarpeeksi voimakas se voi läpäistä yleiset suojatoimet. Näin ollen laitteen suojauksen tulee olla huolellisesti suunniteltu ja kattava selvittääkseen EMP:stä. Yksinkertainen, mutta tehokas keino on kotelointi. Ympäröimällä laite sähkömagneettisen säteilyn läpäisemättömällä materiaalilla voidaan varmistaa, ettei EMP pääse kytkeytymään siihen. Kotelo voi olla esimerkiksi Faradayn häkki tai valmistettu erilaisista metallista, kuten erityisteräsvalmistesta [7]. Materiaalin tärkeimmät ominaisuudet ovat sen kyky absorboida säteilyn energiaa ja heijastaa sitä. Pelkästään suojaava kuori ei kuitenkaan riitä, sillä sen sisällä olevan laitteen tulee olla vuorovaikutuksessa sitä ympäröivän maailman kanssa. Tällöin kotelointi voi harvoin olla täysin yhtenäistä erilaisten tehonsiirto-, sisäänmeno ja ulostulojohtimien (engl. input/output, I/O) takia. Nämä kohdat tarjoavat EMP:lle reitin päästä vaikuttamaan laitteeseen. Ratkaisu tähän ongelmaan on valokuitukaapelien ja erilaisten suodattimien sekä ylijänniterajoittimien käyttö.

Valokuitukaapelien käytöllä ja johtimien koteloinnilla voidaan varmistaa, ettei laitteeseen kulkeviin johtimiin kytkeydy häiriöitä. Valokuitukaapelit ovat kuitenkin herkkiä mekaaniselle rasitukselle ja mikropiirin johtimien kokoluokassa niiden korjaaminen on vaikeaa.

Perinteisiä metallijohtimia voidaan estää kuljettamasta häiriöitä laitteeseen suodattimien ja ylijännitesuojien avulla.

Suodattimet voivat olla esimerkiksi sylinterin muotoisia ferriittisuodattimia, jotka asetetaan kaapelin ympärille. Suodattimen sisäinen käämi päästää normaalit matalataajuiset käyttösignaalit kulkemaan johtimessa, mutta korkeataajuinen pulssi saa käämin vastustamaan sitä Lenzin lain mukaisesti. Ferriittisuodattimien pulssin vaimennus on noin 10–15 dB [7]. Toinen häiriötä estävä suodatintyyppi on LC-suodattimet. LC-suodatin voi olla ali-, yli- tai kaistanpäästösuodatin, joka toimii yhdistämällä käämejä ja kondensaattorin päästäkseen lävitseen vain tietyt taajuudet.

Ylijänniterajoittimilla, kuten kaasupurkausputkilla ja varistoreilla voidaan estää EMP:n aiheuttaman ylijännitteen pääsy suojattavaan laitteeseen. Tehokkain suojaus saadaan yhdistämällä näitä elementtejä monivaiheiseksi rajoittimeksi (engl. multistage suppressor). Yleinen monivaiheisen vaimentimen käyttötapa on hyödyntää ensin divertorina korkean pulssivirran sietokyvyn omaavaa kaasupurkausputkea. Toisena osana käytetään piistä valmistettua ylijännitesuojaa, joka rajoittaa jäännösjännitteen laitteelle sopivalle tasolle (n. 7 V). [23]

Kuten kappaleen alussa mainittiin, myös laitteen piirilevyn suunnittelulla voidaan ehkäistä EMP:stä siihen aiheutuvia ongelmia. Lähekkäin sijoitettujen pinnien ja johtimien väliset jännitteet voivat aiheuttaa esimerkiksi valokaaria. Näiden etäisyyksien kasvattaminen on vaikeaa nykyteknologiassa, jossa tilankäyttö pyritään optimoimaan. Ratkaisuna tähän voidaan käyttää esimerkiksi erikoislakkaa, joka toimii eristeenä komponenttien välillä estäen valokaaret. Päälystämällä koko piirilevy lakalla estetään kuitenkin komponenttien vaihtaminen ja piirin huolto. [7]

3. KEVYEN EMP-LAITTEEN TEKNIikka

Kevyt EMP-laite viittaa tässä työssä aseteknologiana hyödynnettyyn laitteeseen, jonka toimintatarkoitus on luoda vaikutusalueellaan kohdelaitteita vahingoittava EMP ilman ydinreaktiota. Laite on lisäksi fyysisiltä ominaisuuksiltaan tarpeeksi pieni kauko-ohjattavan dronen kannettavaksi kuormaksi. Tässä luvussa perustellaan ensin kevyen EMP-laitteen rajoja, jonka jälkeen esitellään sen valittu toimintaperiaate ja lopuksi arvioidaan teoreettisen laitteen painoa.

3.1 Dronejen kantokyky

Erilaisia drone-malleja on huomattava määrä nykypäivänä. Ne eroavat toisistaan perusominaisuuksiltaan, kuten lentotavaltaan ja käyttövoimajärjestelmältään (engl. propulsion system). Yhdistelemällä näitä ominaisuuksia voidaan luoda käyttötärpeen mukaan optimoituja malleja, kuten esimerkiksi pienen nousu- ja laskeutumisalustan vaativa, nopeasti toimintavalmis drone. Tässä esimerkimmallisissa hyödynnettäisiin VTOL-teknologiaa (engl. vertical takeoff and landing) sekä sähköistä käyttövoimatoimintajärjestelmää. [24] Tämän toiminnallisen monimuotoisuuden takia droneille ei ole olemassa yhteistä virallista jaottelua, mutta eräs yleinen tapa luokitella ne on painon mukaan. Yhdysvaltain puolustusministeriön luokittelu esimerkiksi jakaa dronet 5 ryhmään niiden suurimman mahdollisen kokonaislentoonlähötpainon ja lentokorkeuden mukaan [25]. Näistä ryhmistä tälle työlle merkityksellisimmät ovat ryhmät 1–3. (Taulukko 2)

Taulukko 2. Drone-ryhmien keskimääräisiä ominaispajvoja, muokattu lähteistä [23, 24].

Ryhmä	Paino (kg)	Hyötykuormakapasiteetti (kg)
1	≤ 10	1,5
2	11–25	5,5
3	26–600	Raskaskuorma-droneilla jopa useita satoja

Ryhmän 1 droneihin lukeutuu suurin osa kuluttajille suunnatuista, vapaa-ajan käyttöön tarkoitetuista lennokeista. Erilaisia malleja ja valmistajia on huomattava määrä ja näitä

droneja käytetään pääosin video- ja valokuvaukseen. Kuluttajamarkkinoiden lisäksi kaikkien esiteltävien ryhmien droneja voidaan hyödyntää sotilaskäytössä tulenjohtossa ja tiedustelutehtävissä, joiden kesto ja vaativuus kasvavat dronejen koon myötä. Ryhmän 2 kiinteäsiipisillä droneilla esimerkiksi keskimääräinen lentoaika on 5,5 h kauemmin ja keskimääräinen kantama noin 480 km enemmän kuin ryhmän 1 vastaavilla [24]. Sotilaskäytön lisäksi ryhmän 2 droneja käytetään myös lannoitukseen maanviljelyssä.

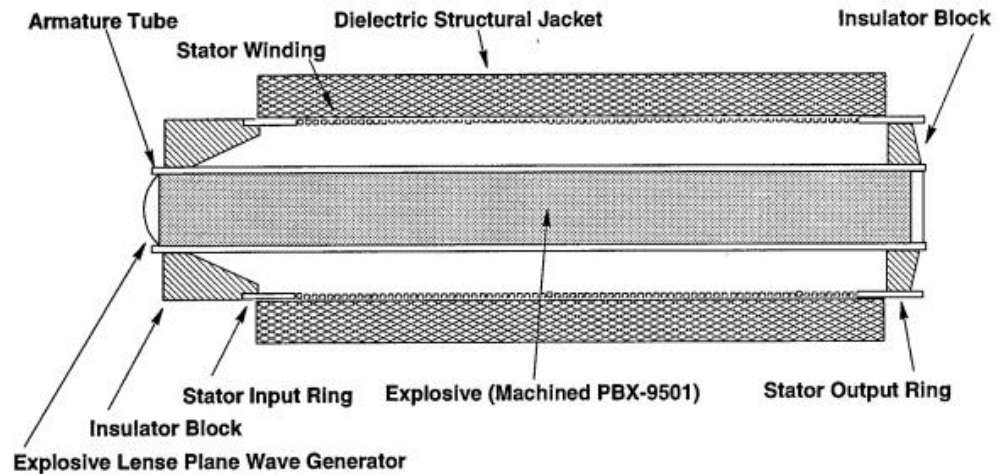
Suurimmat työssä esiteltävät dronet kuuluvat ryhmään 3 ja aiemmista ryhmistä poiketen niiden käyttö vaatii monimutkaisuutensa takia tukiopeatioita ja -infrastruktuuria. Ryhmän 3 dronejen tiedustelutehtävät ovat suorituskyyvyltään esiteltävistä ryhmistä haastavimpia niiden suorittaessa ne suoran näköyhteyden ulkopuolella (engl. Beyond-Visual-Line-Of-Sight, BVLOS) ja niiden jatkuessa tarvittaessa jopa vuorokauden. Ryhmään 3 kuuluu lisäksi raskaskuorma-dronet (engl. heavy lift drone), joiden pääasiallinen tarkoitus on hyötykuorman kuljetus. Nämä dronet voivat saavuttaa jopa satojen kilojen hyötykuormakapasiteetin ja niitä käytetään esimerkiksi lääkkeiden, postin ja katastrofiavun kuljetukseen hankalissa olosuhteissa.

Tämän työn tarkoituksena on selvittää teoreettiselta kannalta, kuinka tehokas puolustuskeino droneja vastaan olisi mahdollista luoda hyödyntämällä kevyttä EMP-laitetta yhdistettynä sitä kuljettavaan droneen. Näin ollen kevyen EMP-laitteen rajoitukset perustuvat käytettävän dronen ominaisuuksiin ja erityisesti sen hyötykuormakapasiteettiin. Tämän seurauksena tässä työssä tarkastellaan esiteltyjen ryhmien mukaisesti EMP-laitteen tehokkuutta sen painaessa alle 1,5 kg, 1,5–5,5 kg tai yli 5,5 kg.

3.2 Toimintaperiaate

Kevyen EMP-laitteen toiminnallisuus voidaan toteuttaa monin eri tavoin, joista tässä työssä keskitytään FCG:n (engl. flux compression generator) ja vircatorin (engl. virtual cathode oscillator) yhdistelmään. FCG valittiin, koska se pystyy tuottamaan suuren määrän energiaa suhteessa tilavuuteensa [26], joka on tärkeää työn tavoitteen kannalta dronejen kantokyvyn ollessa rajoittava tekijä. FCG:n ulostulon kohdistaminen on kuitenkin hankalaa ja sen taajuuskaista rajoittuu alle 1 MHz taajuuksille. Nämä ongelmat voidaan korjata suuritehoisella mikroaaltosäteily-laitteella (engl. high power microwave, HPM). HPM-laitteista työn kannalta sopivin on vircator, sillä se on mekaanisesti yksinkertainen, pieni ja kestävä laite, joka pystyy tuottamaan voimakkaan pulssin toimiessaan suhteellisen laajalla taajuuskaistalla. [1]

Tyypillinen koaksiaalinen FCG muodostuu kupariputkesta valmistetusta rungosta, joka on täytetty räjähdaineella. Rungon ympärillä on kuparijohtimesta kierretty käämi, jota vuorostaan ympäröi epämagneettinen vaippa prosessin magneettisten voimien hallitsemiseksi (kuva 4). Vaipan materiaaliksi käy tässä työssä esimerkiksi lasi tai Kevlar-epoksi-komposiitti niiden keveyden takia. Rungon päässä on lisäksi sytytin, jolla räjähdaineen reaktio käynnistetään. [1]

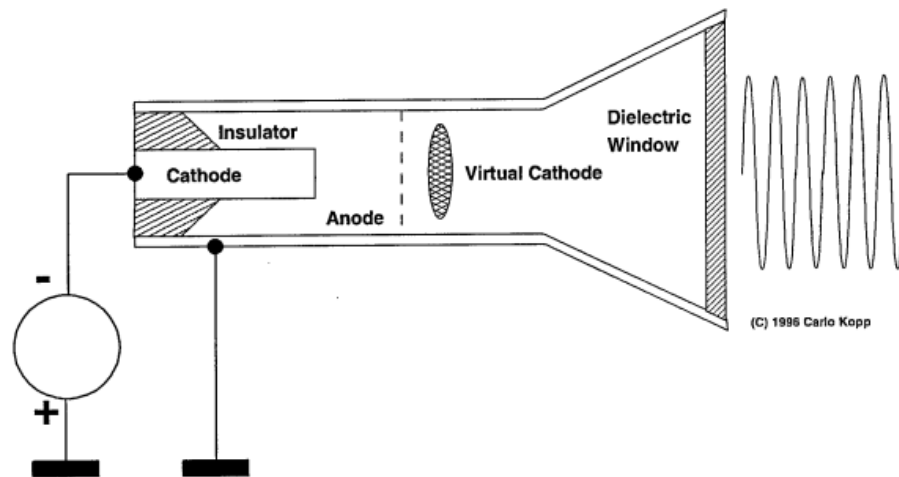


Kuva 4. Koaksiaalisen FCG:n rakenne [1].

Laitteen toiminta vaatii alkuvirtalähteen, joka voi syöttää vähintään kymmenien kV suuruisen pulssin käämiin ja luoda sen läpi kulkevan magneettivuon. Alkuvirran saavuttaessa maksimiarvonsa sytytin laukaisee räjähteen toisesta päästään. Tällöin runkona toimiva kupariputki laajenee ja joutuu kosketuksiin käämin kanssa, oikosulkien sen pään ja vangiten alkuvirran kiertämään sitä. Räjähdysten edetessä yhä suurempi osa rungosta koskettaa käämiä pienentäen sen pinta-alaa, jolloin käämiin indusoituu Lenzin lain mukainen sähkövirta. Indusoitunut sähkövirta pyrkii vastustamaan magneettivuon nopeaa muutosta kasvattamalla magneettikentän voimakkuutta käämin sisällä vahvasti. Tuloksena syntynyt pulssi on kestoltaan 10–100 ms ja sen sisältämä energia voi olla jopa 50 MJ [9]. Sijoittamalla monta FCG:tä kaskadiin voidaan pulssia kasvattaa voimakkaammaksi ennen sen ohjaamista vircatoriin seuraavassa vaiheessa.

Vircator muodostuu katodista, anodiverkosta ja eristeikkunasta (kuva 5). Katodi voi olla esimerkiksi halkaisijaltaan muutaman sentin paksuinen metallitanko, johon FCG:n tuottama pulssi kulkeutuu. Elektrodienvälisen jännite-eron kasvaessa tarpeeksi suureksi katodi lähettää voimakkaan elektronisuihkun anodiverkkoa kohti, jolloin osa elektroneista läpäisee sen. Nämä anodin läpäisseet elektronit muodostavat sen taakse negatiivisen

avaruusvarauksen (engl. space charge), jota kutsutaan virtuaaliseksi katodiksi. Virtuaalisessa katodissa elektronit hylkivät toisiaan ja joutuvat kiihtyvään liikkeeseen takaisin kohti anodia ja sen läpi toistaen ilmiön sen molemmin puolin. Lisäksi virtuaalinen katodi itsessään värähtelee elektronien liikkeen takia, jonka seurauksena molemmat ilmiöt emittoivat sähkömagneettista säteilyä vircatorin ikkunan läpi. Säteilyn ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa laitteen geometrisillä suhteilla ja teholähteen ominaisuuksilla [26].



Kuva 5. Aksiaalisen vircatorin rakenne [1].

Virtuaalinen katodi muodostuu vasta, kun elektronisuihkun virta ylittää avaruusvarauksen rajoittaman virran (engl. space charge limited current). Tämä virtaraja saadaan laskettua kaavalla

$$I_{SCL} = \frac{0,0085}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \sqrt{\left(\gamma^{\frac{2}{3}} - 1\right)^3}, \quad (16)$$

jossa R on tyhjiöputken säde, r on elektronisuihkun säde ja γ on relativistinen kerroin. Relativistinen kerroin voidaan laskea kaavalla

$$\gamma = 1 + \frac{V_{AK}}{0,511}, \quad (17)$$

jossa V_{AK} on vircatorin anodin ja katodin välinen jännite-ero (MV). Virtuaalisen katodin värähtelytaajuus (GHz) lasketaan kaavalla

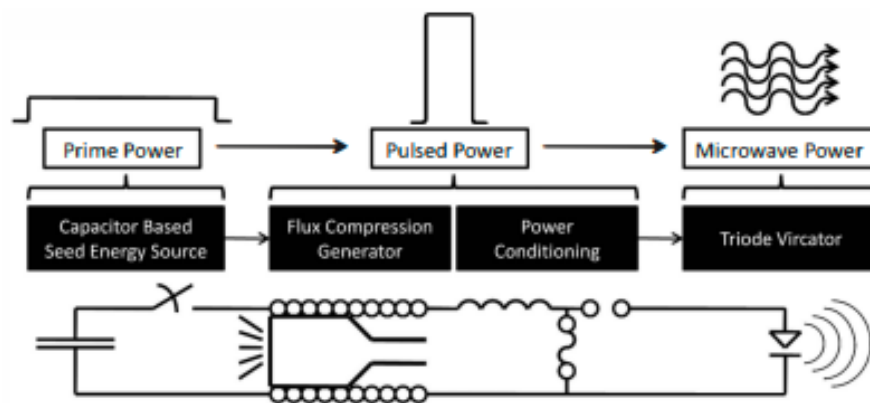
$$f_k = 4,10 \left(\frac{J}{\gamma \frac{v}{c}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (18)$$

jossa J on elektronisuihkun virrantiheys $\left(\frac{kA}{cm^2}\right)$, v on elektronien nopeus ja c on valonnopeus. [27]

3.3 Arvio laitteen painosta

Keveyen EMP-laitteen paino on tämän työn kannalta tärkeä ominaisuus, sillä se vaikuttaa työn aiheena olevan puolustusratkaisun onnistumismahdollisuuteen ja kustannuksiin aiemmassa kappaleessa esitetyllä tavalla. Laitteen painoon vaikuttaa useat tekijät, kuten sen vaadittu ulostulo ja suunnittelu sekä valittu toimintamekanismi ja materiaalit. Muuttujien moninaisuuden takia työn EMP-laitteen painon teoreettinen arviointi voi tuottaa epätarkkoja tuloksia. Tämän vuoksi painon arviointi suoritetaan vertailemalla teoreettista laitetta Texasin teknillisessä yliopistossa vuonna 2009 rakennettuun COMSED 2-laitteeseen. COMSED:in toimintamekanismi perustuu FCG:n ja vircatorin yhdistelmään ja se on suunniteltu kevyeksi hyötykuormaksi esimerkiksi ohjukselle tai dronelle. [2] Näin ollen laitteiden vertaaminen on perusteltua.

COMSED 2 on kertakäyttöinen HPM-laite, joten sen elementit suunniteltiin yksinkertaisiksi ja niiden määrä mahdollisimman vähäiseksi. Eristämällä laitteen räjähtävä osa FCG, voidaan sitä kuitenkin käyttää jatkotutkimuksissa toistuvasti [28]. COMSED koostuu neljästä osiosta: alkuvirtalähteestä, FCG:stä, tehon muuntimesta ja vircatorista (kuva 6). Näistä elementeistä painavin on vircator, sillä muiden osioiden muodostuessa pääosin PVC-putken sisään sijoitetusta yksinkertaisesta elektroniikasta, vircator on sijoitettu ruostumattomasta teräksestä tehdyn tyhjiöputken sisään. [2]



Kuva 6. COMSED 2-laitteen lohkokkaavio [29].

COMSED 2-laitteelle asetetut rajoitukset ja tavoitteet ovat hyvin samankaltaiset tämän työn teoreettisen keveyen EMP-laitteen vastaavien kanssa. Näin ollen voidaan olettaa

että COMSED:in painaessa yhteensä noin 60 kg [28], ei työn puolustusratkaisun kannalta tarpeeksi tehokasta, ryhmään 1 tai 2 kuuluvan dronen kannettavaa EMP-laitetta voida rakentaa. Ryhmään 3 kuuluvat dronet pystyvät kuljettamaan tämän painoluokan EMP-laitetta, mutta niiden kustannukset kasvavat liian suuriksi kertakäyttötoiminnassa. Mainittakoon, että COMSED 2-laite suunniteltiin mahdollisimman pieneksi mitoiltaan eikä painoltaan, ja että sen rakentamisesta on kulunut yli kymmenen vuotta. Tästä huolimatta on perusteltua olettaa, ettei nykyisen tietämyksen mukaan vaihtoehtoiset materiaalit tai teknologian kehitys mahdollista toiminnallisuudeltaan vastaavan laitteen rakentamista vielä alle 5,5 kg painoiseksi.

4. VAIKUTUSTEN ARVIOINTI

Kevyen EMP-laitteen vaikutusta sen kohdelaitteisiin muuttaa useat tekijät, kuten sen ulostulopulssin ominaisuudet ja kohdelaitteen suojaus ulkoisia sähkömagneettisia häiriöitä vastaan. Kohdedronejen monimuotoisuuden takia tässä luvussa keskitytään arvioimaan teoreettisen kevyen EMP-laitteen vaikutuksia yleisesti sen ulostulon perusteella ottamatta kantaa erilaisten kohteiden kärsimisiin seurauksiin pulssista. Luvussa arvioidaan ensin laitteen luoman EMP:n voimakkuutta, jonka jälkeen arvioidaan sen vaikutus-alueetta. Lopuksi viimeisessä kappaleessa esitellään kehityskohtia kevyessä EMP-laitteessa, joilla puolustusratkaisusta saadaan tehokkaampi ja realistisempi vaihtoehto.

4.1 Voimakkuuden arviointi

Työn teoreettisen kevyen EMP-laitteen painon tavoin myös sen toiminnallisuutta voidaan arvioida vertaamalla sitä COMSED 2-laitteeseen. COMSED:in jatkotutkimukset Texasin teknillisessä yliopistossa ovat tuottaneet kattavasti luotettavaa dataa sen tuottamasta sähkömagneettisesta pulssista. Vuonna 2012 julkaistun raportin mukaan laitteen ulostulopulssin taajuuskaista oli noin 4–7 GHz, sen säteilemä huipputeho noin 200 MW ja sen synnyttämän sähkökentän voimakkuus noin 81 kV/m kahden metrin etäisyydeltä mitattuna [28]. Perinteisen ryhmään 1 kuuluvan kuluttajille suunnatun dronen toiminnan estämiseen vaadittavan sähkökentän ja magneettikentän voimakkuuksiksi on mitattu noin 70 kV/m ja 0,16 A/m [30]. Näin ollen on perusteltua olettaa, että puolustuskeinoksi rakennettavasta kevyestä EMP-laitteesta voitaisiin suunnitella tarpeeksi voimakas estämään vihollisdronejen toiminta ja mahdollisesti tuhoamaan ne täysin. Pulssin voimakkuudesta ja käytetystä räjähdaineesta johtuen laitetta hyötykuormanaan kantava drone ei selviä sen laukaisusta. Painottamalla eri ominaisuuksia pulssissa voidaan sen tehoa, vaikutusta elektroniikalle tai toimintasädettä parantaa mahdollisesti muiden ominaisuuksien kustannuksella.

4.2 Vaikutusalueen arviointi

EMP-laitteen vaikutusalue tarkoittaa etäisyyttä, johon asti laitteella on toivottu vaikutus kohteisiinsa. Täten tässä työssä kevyen EMP-laitteen vaikutusalue merkitsee aluetta, jossa laitteen tuottaman sähkö- ja magneettikentän voimakkuudet ovat vähintään 70 kV/m ja 0,16 A/m. EMP:n vaikutus kohdelaitteessa voi vaihdella vaikutusalueenkin sisällä useiden muuttujien, kuten fyysisten esteiden tai kohdelaitteen suojauksen takia, joten työssä esitettävät arviot eivät ole täysin yleispäteviä.

Teoreettiselle kevyelle EMP-laitteelle ei voida laskea tarkkaa toimintasädettä vertaamalla sitä COMSED 2-laitteeseen, sillä siitä ei ole saatavilla kaikkia tarvittavia teknisiä yksityiskohtia. Saatavilla olevien tietojen avulla on kuitenkin mahdollista arvioida vaikutusalueita teoreettisesti etäisyyden neliölakia (engl. inverse square-law) hyödyntämällä. Etäisyyden neliölaki voidaan esittää muodossa

$$\frac{Tehotiheys_1}{Tehotiheys_2} = \frac{Etäisyys_2^2}{Etäisyys_1^2}. \quad (19)$$

Yhtälöstä (9) voidaan ratkaista COMSED:in synnyttämän 81 kV/m sähkökentän tehotiheys ja dronen vikaantumiseen vaadittavan 70 kV/m sähkökentän tehotiheys. Sijoittamalla nämä arvot sekä COMSED:in sähkökentän mittausetäisyys 2 m etäisyyden neliölakiin saadaan yhtälöstä ratkaistua EMP-laitteen teoreettinen toimintasäde

$$Etäisyys_2 = 2 \text{ m} \sqrt{\frac{17,4 \cdot 10^6 \frac{W}{m^2}}{13 \cdot 10^6 \frac{W}{m^2}}} = 2.314 \text{ m}$$

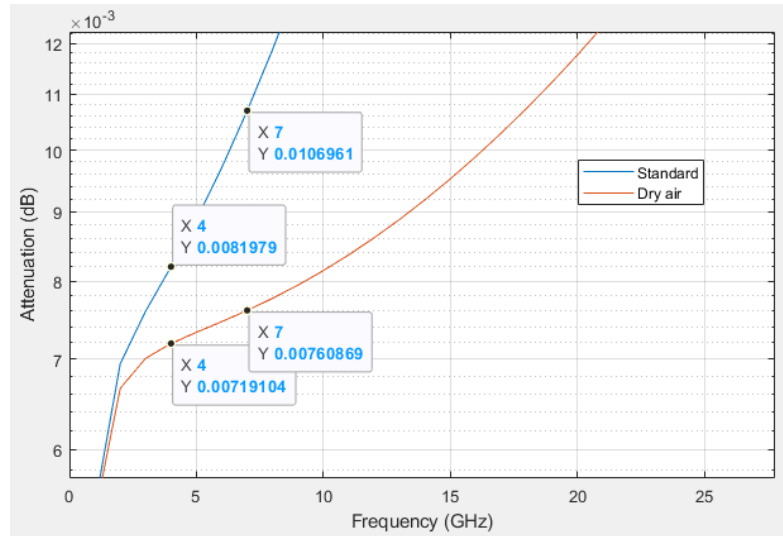
Näin pieni toimintasäde merkitsisi, että EMP-laitteen pallon muotoisen vaikutusalueen halkaisija olisi noin 4,6 m. Tämä tekisi puolustusratkaisun tehokkaasta käytöstä huomattavan hankalaa. Teoreettisen toimintasäteen lisäksi laitteen lähetystehon ja sen vaikutusetäisyyden välistä suhdetta voidaan arvioida. Sijoittamalla kaavaan (2) vikaantumiseen vaadittu tehotiheys voidaan lähettävään antenniin syötettävän tehon ja laitteiden etäisyyden vakiosuhdeluku ratkaista

$$P_d 4\pi = 163,333 \dots \cdot 10^6 = \frac{P_T}{R^2}. \quad (20)$$

Laitteen toimintaetäisyyteen vaikuttaa käytännössä lisäksi lähettävän ja vastaanottavan antennin yksilölliset antennivahvistukset, suuntaus sekä sieppauspinta-ala. COMSED:issa käytetyn torviantennin [2] vahvistus voi esimerkiksi olla yli 20 dB [31], joka vaikeuttaa toimintasäteen tarkkaa arviointia.

Antennien ominaisuuksien lisäksi EMP-pulssin voimakkuuteen etäisyyden kasvaessa vaikuttaa sen vaimeneminen ilmakehän vaikutuksesta. Tarkastelemalla ITU-R P.676-standardia [32] (engl. International Telecommunication Union) Matlab-ohjelmistolla, huomataan kuitenkin, että vaimeneminen on tuotetun EMP:n taajuuskaistalla merkityksentöntä. Kilometrin matkalla 4–7 GHz taajuuskaistalla vaimennus on noin 0.01 dB (kuva 7), joka vastaa noin 0,999 amplitudikerrointa pulssille. Näin ollen ilmakehästä johtuvaa

EMP-pulssin vaimenemista ei tarvitse ottaa huomioon EMP-laitteen suhteellisen pientä vaikutusalueetta arvioitaessa.



Kuva 7. EMP:n taajuuksien vaimennus ilmakehän vaikutuksesta kilometrin matkalla.

4.3 Kehitysmahdollisuudet

Puolustusratkaisussa käytettävää kevyttä EMP-laitetta voidaan kehittää huomattavasti monin eri tavoin. Merkittävin tavoite on vähentää laitteen kokonaispainoa menettämättä kohtuuttomasti sen tehokkuutta. Tämä tavoite on mahdollista saavuttaa käytettyjen materiaalien kehitystyön avulla. Aiemmassa luvussa esitellyn COMSED 2-laitteen vircatorin tyhjiöputken valmistaminen kevyemmästä materiaalista ruostumattoman teräksen sijasta esimerkiksi vähentäisi laitteen painoa mahdollisesti jopa yli kymmenellä kilolla vaikuttamatta negatiivisesti laitteen toiminnallisuuteen. Materiaalien lisäksi myös COMSED:issa käytettyyn FCG:hen verrattuna pienikokoisemmat FCG:t vaativat jatkotutkimuksia. Niiden toiminta on usein epäluotettavaa ja tehovahvistus suhteellisen pientä, mutta jatkokehityksen avulla niistä voi tulla potentiaalisia vaihtoehtoja [31, 32].

EMP-laitteen painon lisäksi sen erilaisten toimintamekanismien jatkotutkimus ja esitetyn puolustusratkaisun kehitys ovat tärkeitä tavoitteita, jotka voivat tuoda esille uusia ratkaisuvia mahdollisuuksia. Erityisesti EMP-laitetta kuormanaan kantavalle dronelle on mahdollista kehittää erilaisia vaihtoehtoisratkaisuja, kuten ajastettu EMP-ammus tai tehokas maasta käytettävä EMP-laite [35]. Venäjänkielinen teknologialehti kirjoitti lisäksi tammi-kuussa 2023 Moskovan rajainstituutin kehittäneen ja patentoineen dronen, joka kantaa kuormanaan EMP-laitetta. Avustetun lentoonlähden jälkeen drone voi kohteen saavuttaessaan laukaista EMP-laitteen ja vaikuttaa kokonaiseen drone-parveen. [36] Lähdettä ei voida kuitenkaan pitää lähtökohtaisesti luotettavana.

5. YHTEENVETO

Tässä työssä selvitettiin, onko droneja vastaan mahdollista luoda puolustuskeino hyödyntämällä kevyttä EMP-laitetta oman dronen hyötykuormana. Selvitys tehtiin määrittelemällä aluksi, millainen kevyen EMP-laitteen tulisi olla fyysisiltä ominaisuuksiltaan ja toimintamekanismiltaan. Tämän jälkeen sen tehokkuutta käyttötarkoituksessaan arvioitiin vertaamalla teoreettista laitetta toiminnallisuudeltaan vastaavaan, Texasin teknillisessä yliopistossa rakennettuun COMSED 2-laitteeseen.

Kevyt EMP-laite voidaan rakentaa suhteellisen yksinkertaisesti yhdistämällä FCG:n ja vircatorin toiminnallisuus. FCG pystyy muuttamaan räjähdäaineen kemiallisen energian voimakkaaksi virtapulssiksi, jonka vircator muuntaa käyttökelpoiseksi sähkömagneettiseksi säteilyksi. Näiden elementtien lisäksi EMP-laite tarvitsee alkuvirtalähteen ja tehon muuntimen toimiakseen tarkoitettusti. Kevyen EMP-laitteen tulisi painaa vähemmän kuin 5,5 kg, jotta kustannustehokkaat ryhmään 1 tai 2 kuuluvat dronet pystyisivät kantamaan sitä hyötykuormanaan. Vertauskohteena käytetty COMSED 2-laite painaa kuitenkin noin 60 kg, joten vaikka se rakennettiin 14 vuotta aiemmin, voidaan perustellusti olettaa, ettei vastaavaa laitetta voida vielä suunnitella tarpeeksi kevyeksi tähän käyttötarkoitukseen. Ryhmään 3 kuuluvat dronet pystyvät kantamaan näin painavaa laitetta kuormanaan, mutta niiden kustannukset ovat huomattavasti suuremmat. Näin ollen ne eivät sovellu yleiseen käyttöön esitetyssä puolustusratkaisussa.

COMSED kuitenkin osoittaa, että on mahdollista suunnitella EMP-laite, jonka tuottama sähkökenttä on tarpeeksi voimakas vahingoittamaan droneja. Dronejen toiminta häiriintyy sähkökentässä, jonka voimakkuus on noin 70 kV/m ja COMSED tuotti vuonna 2012 voimakkuudeltaan noin 81 kV/m sähkökentän. EMP-pulssin voimakkuuden takia sitä kuormanaan kantava drone ei selviä laitteen käytöstä, joten puolustusratkaisu on kertakäyttöinen. COMSED:in tuottaman pulssin taajuuskaista oli noin 4–7 GHz ja säteilemä huipputeho noin 200 MW. Näitä pulssin ominaisuuksia voidaan kehittää käyttötarkoitukseen sopivammiksi laitteen jatkokehityksellä. Kevyen EMP-laitteen toimintasäteeksi arvioitiin teoreettisesti etäisyyden neliölailalla noin 2,3 metriä, mutta sitä ei voitu varmistaa, sillä COMSED:ista ei ollut tarvittavia teknisiä yksityiskohtia saatavilla. Laitteen lähettävään antenniin syötettävän tehon ja kohdelaitteen etäisyyden neliön välille selvitettiin lisäksi laskennallisesti vakiosuhdeluku $163,333... \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$. Työssä esitelty kevyt EMP-laite tarvitsee jatkokehitystä erityisesti käytettyjen materiaalien keventämiseksi, jotta kyseisestä dronejen torjuntakeinosta tulisi realistinen vaihtoehto.

LÄHTEET

- [1] C. Koppf, "The Electromagnetic Bomb - a Weapon of Electrical Mass Destruction", 1996.
- [2] A. Young *ym.*, "Stand-alone, FCG-driven High Power Microwave system", teoksessa *2009 IEEE Pulsed Power Conference*, kesä 2009, ss. 292–296. doi: 10.1109/PPC.2009.5386301.
- [3] C. R. Maggio, T. C. Marshall, ja M. Stolzenburg, "Estimations of charge transferred and energy released by lightning flashes", *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vsk. 114, nro D14, 2009, doi: 10.1029/2008JD011506.
- [4] A. Matthee, P. W. Futter, R. Vogt-Ardatjew, ja F. Leferink, "Lightning Strike EMP Effect On Local Grids", teoksessa *2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, Nusa Dua - Bali, Indonesia: IEEE, syys 2021, ss. 1–4. doi: 10.1109/APEMC49932.2021.9596729.
- [5] "Homepage | IEC". Viitattu: 6. maaliskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.iec.ch/homepage>
- [6] J. Hämäläinen, P. Järviö, S. Kuja-Halkola, P. Silvola, ja J. Paunonen, "Sähkömagneettisten aseiden teknologiaa", *Puol. Tek. Tutkimuslaitos*, vsk. 2009, [Verkossa]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/9219175-Sahkomagneettisten-aseiden-teknologiaa.html>
- [7] V. Gurevich, *Protection of Substation Critical Equipment Against Intentional Electromagnetic Threats*. New York, UNITED KINGDOM: John Wiley & Sons, Incorporated, 2017. Viitattu: 1. maaliskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=4783904>
- [8] E. Compatibility, "Part 2: Environment—Section 9: Description of HEMP Environment—Radiated Disturbance", *IEC Stand.*, ss. 61000–2, 1996.
- [9] J. Kosola, "Digitaalinen taistelukenttä : informaatioajan sotakoneen tekniikka". Viitattu: 9. maaliskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.doria.fi/handle/10024/94298>
- [10] T. M. Lillesand, *Remote sensing and image interpretation*, 3rd ed. New York: Wiley, 1994.
- [11] G. S. N. Raju, *Antennas and wave propagation*, 1st edition. Place of publication not identified: Pearson Education India, 2004.
- [12] "Electromagnetic pulse", *Wikipedia*. 12. helmikuuta 2023. Viitattu: 9. maaliskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electromagnetic_pulse&oldid=1139002963
- [13] "High-Altitude Electromagnetic Pulse and the Bulk Power System: Potential Impacts and Mitigation Strategies". Viitattu: 13. maaliskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.epri.com/research/products/3002014979>
- [14] G. E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits, Reprinted from *Electronics*, volume 38, number 8, April 19, 1965, pp.114 ff.", *IEEE Solid-State Circuits Soc. Newsl.*, vsk. 11, nro 3, ss. 33–35, syys 2006, doi: 10.1109/NSSC.2006.4785860.
- [15] C. Kopp ja R. Pose, "The Impact of Electromagnetic Radiation Considerations on Computer System Architecture", maaliskuu 2023.
- [16] C. Kopp, "An introduction to the technical and operational aspects of the electromagnetic bomb", *J. Electron. Def.*, s. 36, tammi 1997.
- [17] V. V. Shurenkov ja V. S. Pershenkov, "ELECTROMAGNETIC PULSE EFFECTS AND DAMAGE MECHANISM ON THE SEMICONDUCTOR ELECTRONICS", *Facta Univ. Ser. Electron. Energ.*, vsk. 29, nro 4, Art. nro 4, touko 2016.

- [18] "BD139". Viitattu: 14. maaliskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.onsemi.com/products/discrete-power-modules/general-purpose-and-low-vcesat-transistors/bd139>
- [19] "SS8550". Viitattu: 14. maaliskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.onsemi.com/products/discrete-power-modules/general-purpose-and-low-vcesat-transistors/ss8550>
- [20] "BS170". Viitattu: 14. maaliskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.onsemi.com/products/discrete-power-modules/mosfets/bs170>
- [21] "2N7000". Viitattu: 13. maaliskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.onsemi.com/products/discrete-power-modules/mosfets/2n7000>
- [22] S. M. A. Hamed, *Electromagnetics for Engineering Students*. Sharjah: Bentham Science Publishers, 2017.
- [23] O. M. Clark ja R. E. Gavender, "Lightning protection for microprocessor-based electronic systems", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vsk. 26, nro 5, ss. 947–953, syys 1990, doi: 10.1109/28.60066.
- [24] B. Terwilliger, *Small unmanned aircraft systems guide: exploring designs, operations, regulations, and economics*. Newcastle, Washington: Aviation Supplies & Academics, Inc., 2017.
- [25] "DEPARTMENT-OF-DEFENSE-COUNTER-SMALL-UNMANNED-AIRCRAFT-SYSTEMS-STRATEGY", 2021, [Verkossa]. Saatavissa: <https://media.defense.gov/2021/Jan/07/2002561080/-1/-1/1/DEPARTMENT-OF-DEFENSE-COUNTER-SMALL-UNMANNED-AIRCRAFT-SYSTEMS-STRATEGY.PDF>
- [26] L. Dražan ja R. Vrána, "Axial Vircator for Electronic Warfare Applications", vsk. 18, nro 4, 2009.
- [27] J. Benford, J. A. Swegle, ja E. Schamiloglu, *High Power Microwaves*. teoksessa Series in Plasma Physics. Baton Rouge: CRC Press, 2007. doi: 10.1201/9781420012064.
- [28] M. Elsayed, A. Neuber, J. Dickens, J. Walter, M. Kristiansen, ja L. Altgilbers, "An explosively driven high-power microwave pulsed power system", *Rev. Sci. Instrum.*, vsk. 83, s. 024705, helmi 2012, doi: 10.1063/1.3681443.
- [29] M. A. Elsayed ym., "COMSED 2 - recent advances to an explosively driven high power microwave Pulsed Power system", teoksessa *2011 IEEE Pulsed Power Conference*, kesä 2011, ss. 532–535. doi: 10.1109/PPC.2011.6191480.
- [30] W. Zhang, Y. Ning, ja C. Suo, "A Method Based on Multi-Sensor Data Fusion for UAV Safety Distance Diagnosis", *Electronics*, vsk. 8, s. 1467, joulu 2019, doi: 10.3390/electronics8121467.
- [31] R. Poisel, *Antenna Systems and Electronic Warfare Applications*. Norwood, UNITED STATES: Artech House, 2012. Viitattu: 18. kesäkuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=1075916>
- [32] "P.676 : Attenuation by atmospheric gases and related effects". Viitattu: 18. kesäkuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676-13-202208-l/en>
- [33] T. A. Holt, A. J. Young, A. A. Neuber, ja M. Kristiansen, "A Fabrication Method for a Mid-Sized, High-Energy-Density, Flux Compression Generator", teoksessa *2006 IEEE International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*, marras 2006, ss. 281–286. doi: 10.1109/MEGAGUSS.2006.4530689.
- [34] A. A. Neuber, *Explosively Driven Pulsed Power Helical Magnetic Flux Compression Generators*, 1st ed. 2005. teoksessa Power Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. doi: 10.1007/3-540-28673-X.
- [35] "Counter Electronics", Epirus, Inc. Viitattu: 15. kesäkuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.epirusinc.com/counter-electronics>
- [36] "Разработан российский дрон-охотник за БПЛА и радиоэлектронными средствами". Viitattu: 18. kesäkuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.techcult.ru/technics/11742-rossijskij-dron-ohotnik>