PVTT
Suojan osaamiskeskus
Tutkimuksesta suorituskykyä

Sähkömagneettisten aseiden teknologiaa

Juhani Hämäläinen
Petri Järviö
Sami Kuja-Halkola
Perttu Silvola
Jari Paunonen

Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos

Julkaisuja 17

Defence Forces Technical Research Centre
Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos
Publications 17

Sähkömagneettisten aseiden teknologiaa

Juhani Hämäläinen
Petri Järviö
Sami Kuja-Halkola
Perttu Silvola
Jari Paunonen

RIIHIMÄKI 2009

Kannen Kuva:
Jukka Ruoskanen
Kuvien suunnittelu ja toteutus:
Pirjo Laurimaa
Kirjoittajat

ISBN 978-951-25-1991-0 (nid)
ISBN 978-951-25-1994-1 (PDF)
ISSN 1457-3938
Defence Forces Technical Research Centre
Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos

Edita Prima Oy
Helsinki 2009

Alkusanat

Jatkuvasti teknistyvä ja monimutkaistuva toimintaympäristö asettaa kasvavia haasteita erilaisten teknisten perustietojen hallitsemiselle. Monet voimakkaasti kehittyvät ja sotilaallisesti mielenkiintoiset teknologiat liittyvät sähkömagneettisiin ilmiöihin sekä saavutettuna suorituskyvyn parantumisena että uudenlaisten uhkakuvien kehittymisenä.

Kirjoittajat haluavat kiittää Pirjo Laurimaata suuresta avusta kuvien laadinnassa sekä Timo Pulkkista ja Jukka Ruoskasta sisällön oikoluvusta.

Toivotamme lukijoille kiintoisia lukuhetkiä sähkömagneettisten ilmiöiden parissa.

Riihimäellä maaliskuussa 2009

Kirjoittajat

Tiivistelmä

Sähkömagneettisten ilmiöiden monimuotoisuus mahdollistaa niiden soveltamisen laajalti sotilasteknologiassa. Sähkömagneettisen säteilyn avulla voidaan tarkkailla, kontrolloida, häiritä tai jopa tuhota ko. säteilyn kanssa vuorovaikuttavia kohteita. Esimerkkitapauksina mainittakoon sähkömagneettinen pulssi eli EMP, suuren tehon mikroaaltoaseet eli HPM-aseet ja ADS-teknologia. Sähkömagneettisen säteilyn merkittävä sovellusalue on langaton tiedonsiirto, johon käytettäviä laitteita voidaan soveltaa esimerkiksi tienvarsipommien etälaukaisuun. Sähkömagneettisen induktion soveltamista sotilaallisiin laitteisiin edustaa raidetykki, jolla on mahdollista saavuttaa ammuksille aiempaa suurempia lähtönopeuksia.

Tämän julkaisun tavoite on esitellä mainitut mekanismit ja ilmiöt sekä luoda perustaa näiden asioiden ymmärtämiselle.

Asiasanat: Sähkömagnetismi, EMP, mikroaaltoase, HPM, raidetykki, ADS-järjestelmä, RCIED, tienvarsipommi.

Sisältö

1 Johdanto **6**

2 IEMI ja siltä suojautuminen **9**

3 Sähkömagneettinen pulssi, EMP **10**
3.1 Ydinräjähdyksessä syntyvä pulssi, NEMP 10
3.2 Korkearäjähdyksessä syntyvä pulssi, HEMP 12
3.3 Suojautuminen EMP:ltä 13

4 Suuren tehon mikroaaltoaseet, HPM **14**
4.1 Vaikutusmekanismit ja vaikutukset 14
4.2 HPM-aseiden tyypit 15

5 ADS-järjestelmä **18**
5.1 Terveysriskeistä 18
5.2 Järjestelmän käytöstä 19
5.3 Muita havaintoja 19

6 Raidetykki sähkömagneettisena laukaisulaitteena **21**
6.1 Johdanto 21
6.2 Raidetykin toimintaperiaate 21
6.3 Raidetykin teknisiä haasteita 23
6.4 Raidetykkien kehityksen tämänhetkinen taso 23
6.5 Raidetykit tulevaisuudessa 24

7 Tienvarsipommien radiolaukaisu **25**
7.1 Radiolaukaisun edut ja haitat 25
7.2 Radiolaukaisun toteuttaminen 25
7.3 Häirintä vastatoimena 27
7.4 Johtopäätökset 28

8 Yhteenveto **29**

Viitteet **30**

1 Johdanto

Elegantisti esitetty sähkömagnetismin teoria kuvaa kaikki aihealueeseen liittyvät ilmiöt muutaman yhtälön erilaisina osaratkaisuina, joiden perusteella voidaan kehittää sovelluksia. Sähkömagneettisia sovelluksia on käytetty laajalti sotilastarkoituksiin toisesta maailmansodasta lähtien, jolloin tutkan kehittäminen paransi lentokoneiden havainnointia ja siten uhkaan varautumista. Tutka on nykypäivänäkin hyvä esimerkki hyödyllisestä sotilaspuolelta siviilipuolelle siirretystä teknologiasta. Tutka parantaa lentoturvallisuutta päivittäin ympäri maailmaa. Toisaalta se on vaarallinen ja paljon vahinkoa tuottava laite, jos sen käyttötarkoitus muutetaan elektroniikkaa tai ihmisiä vastaan.

Sähkömagneettinen säteily on väliaineessa (ilmassa) valon nopeudella c etenevää aaltoliikettä, jolloin säteilyn taajuus f on määrätty, mikäli aaltoliikkeen aallonpituus λ tunnetaan ja päinvastoin. Tarkemmin sanottuna aallonpituuden ja säteilyn taajuuden tulo vastaa etenemisnopeutta, siis valonnopeutta, eli $c = f\lambda$, ja puhutaan sähkömagneettisen kentän etenemisestä. Tällä yksinkertaisella laskukaavalla pystymme luokittelemaan säteilylähteitä taajuutensa mukaan sekä nimeämään ne standardisoiduin käsittein. Toisaalta säteilyn etenemistä vaikeuttavat sen edetessään kohtaamat esteet sekä väliaineen ominaisuudet, joista mainittakoon ilmakehän (yleisemmin ilman) koostumus, siinä olevat epäpuhtaudet, lämpötila, ilmankosteus ja -tiheys sekä erilaiset fyysiset esteet. Näiden tekijöiden vaikutus vaihtelee suuresti säteilyn taajuuden mukaan, mikä paljolti selittää eri taajuuksilla toimivien ilmiöiden erilaisuutta, esimerkiksi säteilyn läpäisykykyä ja vaimenemista.

Säteilylähteiden teho ja taajuus on valittava kutakin tarkoitusta varten sopivaksi. Tämä periaatteellisesti yksinkertaiselta kuulostava vaatimus kätkee taustalleen huomattavan määrän teknologisia haasteita, joiden ratkaisemiseen vaaditaan sekä perinteisiä että tapauskohtaisesti kehitettäviä menetelmiä ja rakenteita. Tutka on tästäkin hyvä esimerkki, koska käyttötarkoituksesta riippuen sen toimintataajuus vaihtelee suuresti. Tutka perustuu sähkömagneettisen säteilyn lähettämiseen ja vastaanottamiseen. Signaalin palaamisen ja vastaanottamisen edellytyksenä on signaalin heijastuminen kohteesta takaisin, jolloin vastaanotettua signaalia tutkimalla voidaan arvioida heijastaneen kohteen sijaintia, liiketilaa, kokoa ja muotoa. Sotilaskohteille luonnollisesti tavoitellaan huonoa näkyvyyttä tutkassa eli pyritään häivyttämään kohteet sen ulottuvilta. Tutkan toimintataajuuden valinnalla pyritään maksimoimaan tavoitellun havainnointiympäristön, kustannuksien ja fyysisten ominaisuuksien kokonaishyötysuhdetta. Esimerkiksi autoissa käytettävän peruutustutkan ei tarvitse havainnoida kohteita kilometrien etäisyydeltä, kun taas lennonjohdossa käytettävien tutkien kannalta suuret etäisyydet ovat oleellisia.

Toinen tuttu, käsiteltäviä aiheita lähellä oleva esimerkki on mikroaaltouuni, jo-

ka nimensä mukaisesti toimii mikroaaltoalueella. Mikroaaltoina pidetään tavallisesti taajuuksia 300 MHz – 30 GHz, mikä aallonpituuksina vastaa väliä 1 cm – 100 cm. Mikroaaltouunin noin 2,45 GHz:n säteily (vastaa noin 12 cm:n aallonpituutta) saadaan magnetronista, ja ruoan lämmitys perustuu säteilevän sähkömagneettisen kentän kykyyn liikutella ruoan vesimolekyylejä. Sähkömagneettisella säteilyllä voidaan lämmittää myös muuta orgaanista ainetta, esimerkiksi kudosta. Tähän perustuu teknologia, jolla pyritään vaikuttamaan ihmisiin pakottamalla heidät siirtymään pois ei-toivotulta alueelta. Tämä tapahtuu altistamalla ihmisiä sähkömagneettiselle säteilylle, joka kuumentaa ihon pintakerrosta, ihoa kuitenkaan polttamatta, aiheuttaen voimakkaan kipureaktion. Tällöin kenttään joutunut henkilö pyrkii poistumaan vaikutusalueelta mahdollisimman pian. Teknologia tunnetaan nimellä ADS (Active Denial System).

Sähkömagnetiikan ilmiöt eivät suinkaan rajoitu sähkömagneettiseen säteilyyn, vaan ilmiökenttään kuuluu myös muuttuvien kenttien väliaineeseen aiheuttamat muutosta vastustavat kentät eli sähkömagneettinen induktio, jossa joko kenttä muuttuu tai tarkasteltava kappale liikkuu kentässä. Muuttuva sähkökenttä esimerkiksi indusoi kappaleeseen magneettikentän, joka vastustaa kentän muutosta. Ilman tätä ilmiötä sähkötekniikan sovelluksista suurta osaa ei olisi voitu toteuttaa lainkaan. Mainittakoon esimerkkeinä vaihtovirta, sähkömoottorit sekä kaikki kelat elektroniikassa. Sähkömagneettiseen induktioon liittyy läheisesti kentän kytkeytyminen, jonka takia sähkömagneettinen kenttä voi häiritä elektronisia laitteita. Ilmiötä voidaan soveltaa myös ammusten laukaisulaitteistoissa tavanomaisten kemiallisten ajoaineiden sijasta (esimerkkinä raidetykki). Tämä teknologia on ollut tunnettua pitkään, mutta vasta viime vuosina se on alkanut näyttää realistiselta vaihtoehdolta operatiiviseenkin käyttöön.

Tutkaesimerkin yhteydessä mainittiin signaalin lähettäminen ja vastaanottaminen informaation keräämistarkoituksessa. Tähän ajatukseen perustuu myös monien muiden radiolaitteiden käyttö. Niinpä radiota voidaan käyttää myös pommien etälaukaisuun, johon voidaan soveltaa esimerkiksi matkapuhelimia, kaukosäätimiä tai lähes mitä tahansa muita lähetin–vastaanotin-parin sisältäviä järjestelmiä. Tämä uhka on nykypäivää paitsi kriisialueilla myös varteenotettavana tekijänä siviiliyhteiskunnan toimintojen ylläpidossa.

Sähkömagneettisten ilmiöiden hyödyntäminen aseiden suunnittelussa ja toteutuksessa on tosiasia. Tällöin voitaneen puhua sähkömagneettisista aseista, joiden muodostama uhka on nykyisin todellinen sekä sotilas- että siviilikohteille. Maailman muuttumiseen liittyvät kielteiset ilmiöt (kuten terrorismi, maailmanlaajuiset yhteiskunnalliset epäkohdat, epäsymmetriset vastakkainasettelut, fanaattiset liikkeet jne.) ovat tuoneet esille uusia uhkia. Mahdollisuus vaikuttaa vastustajan elektroniikkaan radiotaajuisilla aseilla, joko häiriten tai jopa tuhoten, on houkuttele-

va vaihtoehto. Toisaalta jo kauan tunnetut sähkömagneettiset uhkatekijät (esim. EMP) eivät ole kadonneet, vaan ne ovat edelleen todellisia uhkia laajamittaista elektroniikan lamauttamista ajatellen.

Kaiken kaikkiaan sähkömagneettisten ilmiöiden soveltaminen sotilastarkoituksiin on ollut vuosikymmenten ajan hyvin laajaa ja erityisesti aihealueen tutkimukseen on käytetty merkittävästi resursseja. Tämän takia haluamme rajata tarkastelua joihinkin esimerkkeihin. Tässä yhteydessä tarkastellaan sähkömagneettista teknologiaa soveltavia asejärjestelmiä sekä niihin liittyviä uhkia. Teemoiksi on valittu sähkömagneettiset pulssit (EMP), suuren tehon mikroaaltoaseet (HPM), improvisoitujen pommien radiolaukaisu (RCIED), raidetykit sekä ihoa lämmittävä teknologia (ADS).

2 IEMI ja siltä suojautuminen

Tahallista häirintää aiheuttavien laitteiden kehitys on herättänyt jo pitkään sotilaallista kiinnostusta ympäri maailma, mutta nyttemmin myös siviiliviranomaiset ovat kiinnostuneet IEMI:n (Intentional ElectroMagnetic Interference) aiheuttamista riskeistä siviili-infrastruktuurille lähinnä seuraavista syistä:

- Pienitehoiset mutta häirintäkelpoiset lähettimet ovat kohtalaisen helppoja rakentaa tekniikkaan perehtyneille henkilöille.
- Nykyään myös valmiita lähettimiä on helposti saatavilla.
- Infrastruktuuri ja laitteet eivät yleisesti ole hyvin suojattuja IEMI:ä vastaan.
- Yhteiskunnan kriittisiä kohteita (viestintä, liiketoiminta, liikenne) hoidetaan automaattisesti, mikä lisää niiden haavoittuvuutta.
- IEMI:ä aiheuttavien laitteiden käyttö on vaikea havaita ajoissa. Myös mahdollisen käytön todistaminen on vaikeaa.
- Häirintälaitteiden käyttökynnys sekä ”harjoittelukynnys” ovat matalia, koska ne eivät aiheuta (yleensä) henkilövahinkoja eikä käytöstä jää välttämättä jälkiä.

Tulevaisuudessa on mahdollista, että IEMI-laitteita käytetään terrorismin välineinä, mikä aiheuttaa tarpeen valmistautua niitä vastaan erilaisin suojauskeinoin. Suojauskeinoista oleellisimmat ovat tärkeisiin tiloihin ja niiden lähelle pääsyn estäminen asiattomilta, sekä tilojen ja laitteiden immuniteetin lisääminen. Suojautumisen kannalta kustannustehokkaimman yhdistelmän selvittäminen vaatii huomattavan määrän perustietoutta aina signaalien etenemisestä ja vaimenemisesta erilaisten suojaustekniikoiden suorituskyvyn tuntemiseen ja teknisesti toteutettavissa olevien laitteiden suorituskyvyn arvioimiseen.

Koska laitteet ovat yksilöitä (jopa saman tuoteryhmän sisällä), ei tässä voida antaa absoluuttisia raja-arvoja tehotasoista eikä muistakaan yksityiskohdista. Kunkin laitteen herkkyys tulisikin arvioida sekä laitteena itsenään että sen käyttöpaikassa ja -olosuhteissa, ja vasta sen jälkeen muodostaa arvio laitteen tai sen osan haavoittuvuudesta. Erityisesti tulee muistaa, että vaikka tärkeimmät laitteet olisivatkin suojattuja, saattaa vähemmän tärkeinä pidettyjä osia kokonaisuudesta olla hyvinkin alttiina häirintäsignaalille. Näistä mainittakoon johdotukset, näyttölaitteet, talojen ikkunoinnit (suuntaus, niille näköyhteyteen pääseminen), kulkuväylät ja kaikki tietoverkot. Sekä tahattomilta että tarkoituksellisesti aiheutetuilta häiriöiltä suojautumisessa harmittomalta vaikuttava yksityiskohta saattaa heikentää kokonaissuojaa merkittävästi.

3 Sähkömagneettinen pulssi, EMP

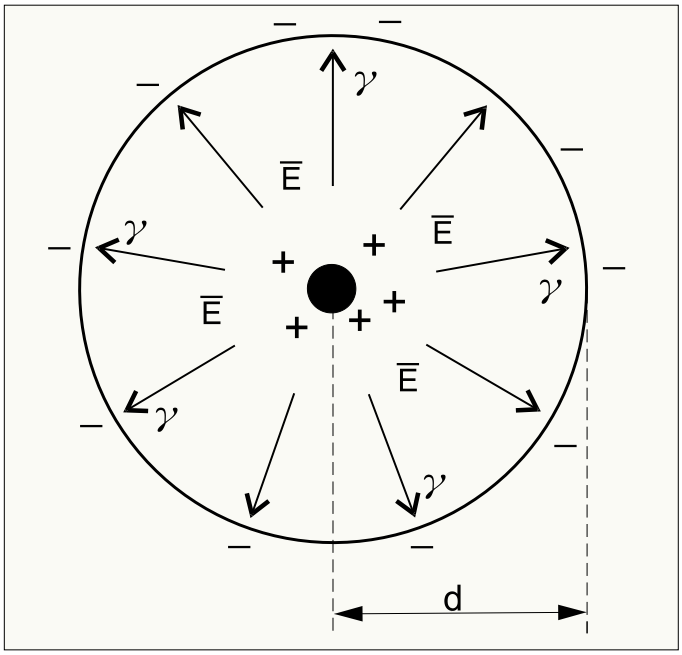
Termillä EMP (ElectroMagnetic Pulse) tarkoitetaan useimmiten ydinräjähdyksessä syntyvää sähkömagnettista pulssia, mutta syntymekanismi voi olla muukin. On määritelty muutamia tarkentavia alakäsitteitä. Termiä NEMP (Nuclear ElectroMagnetic Pulse) käytetään, kun halutaan painottaa, että pulssi on tuotettu erityisesti ydinräjähdyksellä. Kaikissa ydinräjähdyksissä syntyy aina jonkinasteinen sähkömagneettinen pulssi. Tietyissä erikoistilanteissa pulssi voi olla hyvinkin voimakas, kuten esimerkiksi korkealla ilmakehän yläpuolella tapahtuvassa ydinräjähdyksessä. Tällöin pulssista käytetään nimitystä HEMP (High altitude ElectroMagnetic Pulse). Muutkin ilmiöt kuin ydinräjähdykset voivat tuottaa sähkömagneettisen pulssin. Esimerkiksi salaman iskussa syntyvää pulssia kutsutaan nimellä LEMP (Lightning ElectroMagnetic Pulse). LEMP on voimakkuudeltaan huomattavasti esimerkiksi HEMP:iä heikompi, mutta voi silti olla merkittävä pienillä etäisyyksillä. Tässä luvussa keskitytään vain ydinräjähdyksessä syntyviin sähkömagneettisiin pulsseihin.

Mikäli sähkömagneettinen pulssi on hyvin voimakas, voi se syntymekanismista riippumatta aiheuttaa vaurioita elektronisiin laitteisiin. Voimakas sähkömagneettinen kenttä kytkeytyy laitteen metallirakenteisiin saaden aikaan virtapulssin. Nykyaikaisissa mikropiireissä johdinrakenteet ovat erittäin pienikokoisia. Johtimien leveydet ovat pienimillään jopa alle 100 nm. Näin kapeat johtimet ovat hyvin herkkiä vaurioitumaan pienenkin virtapulssin tai ylijännitteen vaikutuksesta. Mikäli virtapulssi kulkeutuu suodattimista tai ylijännitesuojista huolimatta mikropiirille saakka, voi seurauksena olla fyysisiä vaurioita.

3.1 Ydinräjähdyksessä syntyvä pulssi, NEMP

Tarkastellaan sähkömagneettisen pulssin syntymekanismia ydinräjähdyksen yhteydessä. Tapahtumaan vaikuttaa useita varsin monimutkaisiakin ilmiöitä, mutta tarkastellaan tässä vahvasti yksinkertaistettua tilannetta. Ydinräjähdyksessä syntyy aina voimakas gammasädepulssi, joka säteilee kaikkiin suuntiin jokseenkin yhtä voimakkaana. Gammasäteet irrottavat ympäröivästä väliaineesta elektroneja ja luovuttavat niille liike-energiaa. Elektronit sinkoutuvat keskimäärin etäisyyden d päähän alkuperäisestä sijaintipaikastaan, kuten on esitetty kuvassa 3.1. Etäisyys d riippuu väliaineen tiheydestä sekä gammasädepulssin voimakkuudesta. Syntyy kaksi sähköisesti varattua pallonkuorta, joiden välissä on voimakas sähkökenttä. Sähkökenttä saa elektronit kiihtyvään liikkeeseen jolloin ne sinkoutuvat takaisin sisemmälle pallonkuorelle. Kiihtyvässä liikkeessä oleva varattu hiukkanen säteilee sähkömagneettista säteilyä. Niinpä ulomman, negatiivisesti varatun pallonkuoren sinkoutuessa kohti sisempää, positiivisesti varattua kuorta, syntyy voimakas sähkömagneettinen pulssi. Pulssi on sitä voimakkaampi mitä suurempi on etäisyys d,

joka puolestaan kasvaa väliaineen tiheyden pienentyessä.



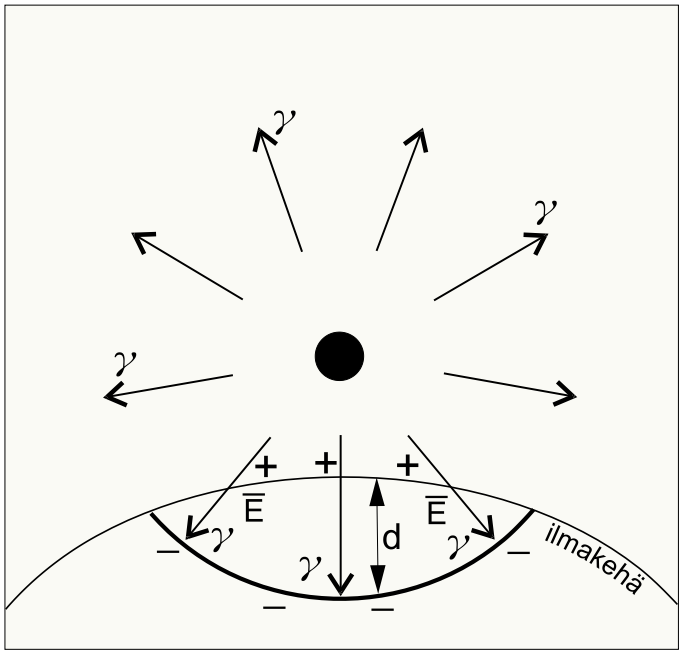
Kuva 3.1: *Kaaviokuva sähkömagneettisen pulssin syntymekanismista ydinräjähdyksen yhteydessä*

Sähkömagneettinen säteily suuntautuu yhtä voimakkaana kaikkiin suuntiin, olettaen, että väliaine on homogeenista. Säteilijänä toimii tässä radiaalisuuntaisessa kiihtyvässä liikkeessä oleva varattu pallonkuori. Täysin pallosymmetrisessä ideaalisessa tilanteessa pulssin amplitudin tulee olla nolla säteilijän kaukokentässä. Kaukokentällä tarkoitetaan aluetta, jossa pulssi on saavuttanut lopullisen muotonsa. Lähikentäksi kutsuttu alue sijoittuu säteilijän ja kaukokentän väliin. Lähikentässä pulssimuoto ei ole vielä kehittynyt lopulliseksi. Pulssin amplitudi voi lähikentässä olla merkittävä, mutta sen vaikutukset peittyvät helposti ydinräjähdyksen muiden vaikutusten alle.

Todellisuudessa tilanne ei ole aivan näin yksinkertainen. Ydinlatauksen räjähtäessä ilmakehässä, voidaan väliaineen olettaa olevan homogeeninen. Vapaat elektronit kuitenkin vuorovaikuttavat myös maan magneettikentän kanssa, josta syntyy myös sähkömagneettista säteilyä. [1][2].

3.2 Korkearäjähdyksessä syntyvä pulssi, HEMP

Mikäli ydinlataus räjäytetään korkealla ilmakehän yläosissa tai kokonaan ilmakehän yläpuolella, ei väliaine ole homogeeninen. Säteilijä ei tällöin ole enää pallosymmetrinen, eikä pulssin amplitudi ole nolla kaukokentässä. Kuva 3.2 havainnollistaa tilannetta. HEMP:n voidaankin ymmärtää olevan NEMP:n erikoistapaus. Ydinräjähdys määritellään korkearäjähdykseksi, kun korkeus maanpinnasta on yli 30 km. HEMP:n tapauksessa sähkömagneettinen pulssi saattaa olla erittäin voimakas, koska yläilmakehä on hyvin ohutta ja etäisyys d kasvaa suureksi. Pulssin syntymekanismiin vaikuttavat lisäksi monet muutkin seikat, kuten maan magneettikenttä, ionosfääri, auringon toiminta jne. Ohitetaan tässä kuitenkin monimutkaisemmat mekanismit.



Kuva 3.2: *Kaaviokuva sähkömagneettisen pulssin syntymekanismista ydinlatauksen räjähtäessä korkealla ilmakehän yläpuolella.*

Riippuen ydinlatauksen räjähdyskorkeudesta, pulssin peittoalue saattaa olla hyvinkin laaja, jopa kokonaisen mantereen laajuinen. 300–400 km:ä suuremmilla räjähdyskorkeuksilla ei pulssin peittoaluetta kuitenkaan saada enää mainittavasti kasvatettua. HEMP:n tyypillinen sähkökentän amplitudi maanpinnalla on luokkaa 50 kV/m. Pulssin nousuaika on muutamia nanosekunteja, kuitenkin yleensä alle 10 ns. Nousuajalla tarkoitetaan aikaa, jolloin pulssin amplitudi nousee 10%:sta

90%:iin maksimiarvosta. Pulssin laskuaika puolestaan on joitain satoja nanosekunteja. HEMP:n muoto on varsin terävä, joten sen kesto määräytyy pitkälti nousu- ja laskuajan mukaan. Pulssin teho sijoittuu verraten matalalle taajuuskaistalle. Pääosa pulssin tehosta on alle 10 MHz:n taajuuksilla. [1][2][3][4].

3.3 Suojautuminen EMP:ltä

Nykyaikaisissa mikropiireissä viivanleveydet ovat kapeimmillaan alle 100 nm. On helppo ymmärtää, että liian voimakas jännitepulssi riittää vaurioittamaan mikropiiriä. Jos EMP:n amplitudi on 50 kV/m, täysin suojaamaton elektroniikka kärsii vaurioita, etenkin jos pulssi pääsee kytkeytymään laiteeseen jonkin kookkaan metallirakenteen kuten antennin tai maston kautta. Pulssi kytkeytyy tehokkaasti suuriin metallirakenteisiin, kuten sähkölinjoihin, puhelinjohtoihin tai lanka-antenneihin.

EMP:ltä suojautuminen on onneksi melko yksinkertaista aivan tavallisten EMC-häiriösuojausten keinoin. Tehokkaita suojauskeinoja ovat mm. tiivis metallikuori, hyvä maadoitus, suojatut kaapelit, suodattimet ja ylijännitesuojat. On kuitenkin muistettava, että EMC-suojaus on aina optimoitu jollekin tietylle taajuusalueelle. Tästä syystä tehokkaasti EMC-suojattu laite ei välttämättä ole hyvin suojattu EMP:tä vastaan, koska taajuusaluetta ei ehkä ole optimoitu EMP:n taajuusalueelle. Usein kuitenkin pelkkä metallikuori riittää suojaamaan laitetta ainakin jonkin verran.

4 Suuren tehon mikroaaltoaseet, HPM

HPM-ase (High Power Microwave) toimii nimensä mukaan mikroaaltoalueella eli taajuuksilla 300 MHz – 30 GHz. Joidenkin lähteiden mukaan mikroaaltoalue alkaa vasta 1 GHz:stä, mutta käytämme tässä määritelmää, jonka mukaan mikroaallot vastaavat ilmassa aallonpituuksia 1 cm – 100 cm. HPM-aseen ero perinteisiin härintälaitteisiin on lähinnä siinä, että HPM-aseella on tavoitteena tuhota elektroniikkaa tai lamauttaa se niin, ettei sen käyttö ilman jonkinlaista korjausta tai huoltoa onnistu.

HPM:stä ei ole kirjoitettu standardeja, joten suuri teho käsitteenä on hiukan epämääräinen. Yleisesti suuren tehon rajana pidetään 100 MW:a, mutta HPM-aseeksi voitaneen hyväksyä myös teholtaan pienemmät laitteet, joiden tarkoituksena on lamauttaa tai tuhota elektroniikkaa eikä vain häiritä sitä. Tällöin olisikin ehkä väärin puhua häirintälaitteesta, jollaisena HPM-asetta voidaan luonnollisesti myös käyttää.

4.1 Vaikutusmekanismit ja vaikutukset

HPM-aseella vaikutetaan kohteeseen joko suoraan (front-door coupling) tai epäsuorasti (back-door coupling). Suora vaikuttaminen perustuu siihen, että käytetään taajuutta, jolla kohde pyrkii maksimoimaan vastaanottamansa energian [5]. Toisin sanoen HPM-aseen taajuudeksi valitaan kohdelaitteen käyttötaajuus, ja aseen keila pyritään kohdistamaan suoraan kohdelaitteen antennin pääkeilaan. Tämä voi olla vaikeaa, jos kohde on esimerkiksi suunnattu vastustajan puolustuslinjan suuntaisesti. Antennin sivukeilastakin voidaan toki vaikuttaa, mutta silloin järjestelmästä riippuen menetetään aseen tehosta 10 – 30 dB tai jopa enemmän. Häirintäteho kytkeytyy herkkään vastaanotinkomponenttiin (yleensä puolijohde, jossa herkimpänä alueena on puolijohderajapinta).

Epäsuora vaikuttaminen tapahtuu eri taajuudella kuin kohdejärjestelmä toimii, jolloin HPM-pulssin toivotaan pääsevän kohteen sisään kotelon aukoista ja läpivienneistä. Häirintäteho kytkeytyy esimerkiksi tehonsyöttö- tai signaalikaapeleihin tai antenneina toimiviin pitkiin johdotuksiin. Epäsuoran vaikuttamisen ongelmana on sen suuri häviöllisyys. Kytkeytyminen kaapeleihin voi olla heikkoa ja koteloinnista riippuen suojaustaso voi vaihdella merkittävästi. Epäsuoralla vaikuttamisella on kuitenkin merkitystä tilanteissa, joissa suora vaikuttaminen on mahdotonta.

Huomiota tulee kiinnittää myös HPM:n biologisiin vaikutuksiin. On havaittu, että ne ovat voimakkaasti taajuudesta riippuvaisia ja että pulssimuotoinen teho vaikuttaa voimakkaammin kuin vastaavan suuruinen jatkuva teho [6]. Erityisesti säteilyn

on havaittu absorboituvan kudokseen lähes täysin taajuuksilla 1 GHz – 3 GHz eli juuri HPM-taajuuksilla.

4.2 HPM-aseiden tyypit

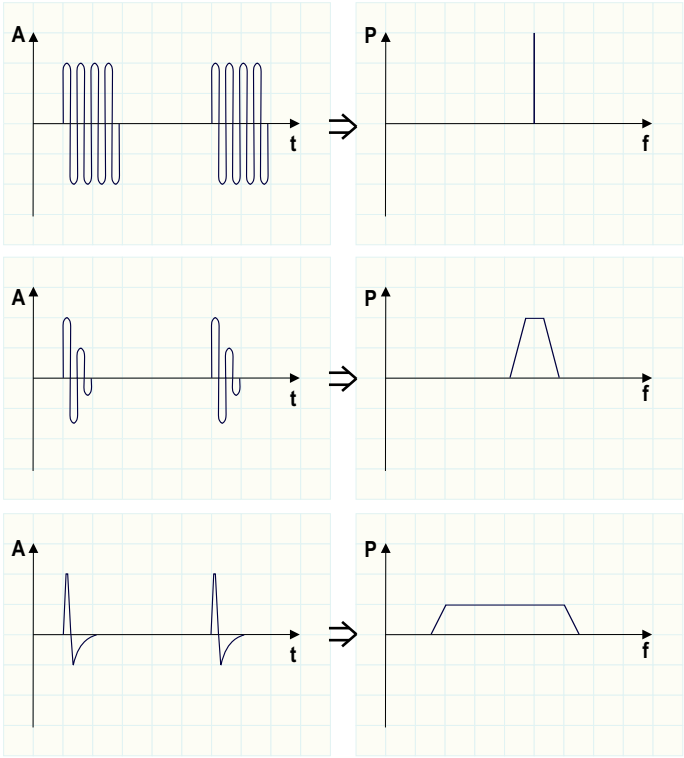
HPM-aseet voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

1. räjähde–HPM-aseet,
2. kapeakaistaiset HPM-lavettiaseet ja
3. laajakaistaiset HPM-lavettiaseet eli UWB- tai MB-lähteet (UWB=Ultra Wide Band, MB=Moderate Band).

Tarkastellaan seuraavaksi lyhyesti mainittujen asetyyppien toimintaperiaatteita ja ominaisuuksia. Kuvassa 4.1 on selvitetty erilaisten HPM-aseiden lähettämiä pulsseja sekä aika- että taajuustasossa. Kuva on periaatteellinen, todellisuudessa pulsseja lähetetään huomattavasti harvemmin kuin kuvassa.

Räjähde–HPM-aseessa räjähdeaineen kemiallinen energia muutetaan sähkömagneettiseksi energiaksi. Kelassa kulkevan virran aiheuttama magneettivuo pakotetaan muuttumaan nopeasti räjäyttämällä kela, jolloin saadaan aikaan voimakas virtapulssi. Mekanismi voidaan sarjaräjähdyksin toistaa. Kun virta on riittävän suuri, ohjataan se RF-tehoputkeen, jossa virta muuttuu sähkömagneettiseksi säteilyksi ja lopullinen HPM-pulssi syntyy. Räjähde–HPM-ase on luonnollisesti kertakäyttöinen ja siitä lähtee vain yksi, mutta erittäin voimakas pulssi. Ase kuljetetaan kohteen lähelle esim. tykinammuksessa tai risteilyohjuksessa, jolloin tehovaikutus saadaan maksimoitua. Yksittäisen pulssin heikkoutena on sen tarkkuusvaatimus eli tykinammukseen tai risteilyohjukseen asennettu ase on saatava toimimaan oikeassa paikassa, oikeaan aikaan ja oikeaan suuntaan. Muuten tavoiteltuja vaikutuksia ei synny lainkaan.

Kapeakaistaiset HPM-aseet lähettävät tietyllä mikroaaltotataajuudella olevaa tehoa pulssintoistotaajuuteensa nähden lyhyinä pulsseina. Nämä laitteet koostuvat esim. teholähteestä, pulssigeneraattorista, RF-tehoputkesta ja antennista. Kapean taajuuskaistansa ansiosta tällaisilla aseilla saadaan aikaan erittäin suuri teho halutulla taajuudella (kuva 4.1). Tämän takia kapeakaistainen HPM-ase soveltuu parhaiten suoraan vaikuttamiseen. Jos kohteen toimintataajuus tunnetaan, voidaan sitä häiritä tai yrittää tuhota juuri oikealla taajuudella. Mikäli kohteen toimintataajuus eroaa HPM-aseen taajudesta ja kohteen kotelo suojaa hyvin juuri aseen taajuudella, saattaa vaikutus jäädä vaatimattomaksi.



Kuva 4.1: *Erilaisia HPM-pulsseja. Vasemmalla aikatasossa ja oikealla taajuustasossa. Ylimpänä kapeakaistainen lähde, keskellä MB-lähde ja alimpana UWB-lähde.*

Laajakaistaisia HPM-aseita voidaan edelleen jaotella ”ultraleveisiin” (UWB) ja ”keskileveisiin” (MB) seuraavan kriteerin mukaan [7]:

- UWB: kaistanleveyden suhde keskitaajuuteen $> 0{,}25$.
- MB: kaistanleveyden suhde keskitaajuuteen on $0{,}01 - 0{,}25$.

Tässä kaistanleveys tarkoittaa leveintä taajuuskaistaa, jolla ylä- ja alarajataajuuksien väliin jäävä energia on 90 % pulssin kokonaisenergiasta. Keskitaajuus on ylä- ja alarajataajuuksien aritmeettinen keskiarvo.

UWB-lähteet ovat laitteita, jotka lähettävät erittäin laajakaistaisia pulsseja. Laitteet ovat systeemitasolla yksinkertaisia, mutta suurten jännitteiden ja erittäin nopeiden nousuaikojen vuoksi hankalia toteuttaa. UWB-lähde koostuu yksinkertaisimmillaan teholähteestä, pulssimuuntajasta, erittäin nopeasta suurjännitekytkimestä ja impulssiantennista. UWB-lähteen erittäin kapea pulssi tuottaa laajakaistaisen lähetteen. Tällöin kuitenkin pulssin energia jakautuu laajalle taajuusalueelle,

jolloin yksittäisellä taajuudella oleva energia jää pieneksi kuten kuva 4.1 havainnollistaa. Tämä voi olla UWB-lähteen ongelma, sillä suorassa vaikuttamisessa teho kohdelaitteen toimintakaistalla saattaa jäädä liian pieneksi. UWB-lähteen edut tulevat kuitenkin siitä, että epäsuorassa vaikuttamisessa saattaa kohdelaitteesta löytyä heikko kohta jostain UWB-lähteen kaistalta. Myös silloin kun kohdelaitetta ei tunneta tai sen voidaan olettaa olevan suojattu HPM:ää vastaan toimintataajuutta lukuunottamatta, UWB-lähde voi olla riittävä ainakin häiritsemään kohdetta. Kapeakaistaisen HPM-aseen taajuus voi sattua kohteen toimintakaistan ulkopuolelle, jolloin vaikutukset voivat olla riittämättömiä, kun taas UWB-lähde voi tehota tällöin paremmin.

MB-lähde on kapeakaistaisen ja UWB-aseen välimuoto (ks. kuva 4.1). Tehoa levitetään taajuustasossa, jotta saavutettaisiin UWB-lähteen edut välttäen samalla sen haitta eli tehon liika leviäminen taajuustasossa. Teho pyritään keskittämään sille taajuusalueelle, jolla todennäköisimmin saadaan vaikutuksia aikaan. Vastaavasti kapeakaistaiseen HPM-aseeseen verrattuna MB:ssä pyritään levittämään taajuuskaistaa, jolloin kohdelaitteen heikot kohdat löydetään helpommin, kuitenkin samalla säilyttäen korkea tehotiheys. Käytännössä suurjännite- ja radiotekniikan ristiriitaisten vaatimusten vuoksi keskitaajuudet jäävät kuitenkin alemmille HPM-taajuuksille, mitä rajoitetta ei kapeakaistaisilla ja UWB-aseilla ole.

5 ADS-järjestelmä

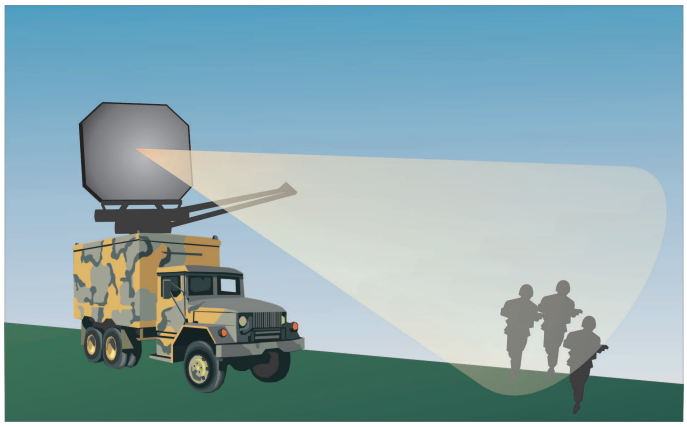
ADS (Active Denial System) on millimetriaaltoalueella toimiva lamautusase, jolla saatetaan ihmisiä toimintakyvyttömäksi ihoa nopeasti lämmittämällä. Laitteen käyttötarkoitus voidaan nähdä puoliväkivaltaisena pakottamisena tilanteissa, joissa puhe ei auta, mutta perinteisten voimatoimien käyttö on kyseenalaista.

ADS-järjestelmää on kehitetty pitkään ja laajoin resurssein. Tutkimuksesta merkittävä osuus on keskittynyt millimetriaaltoalueen säteilyn biologisiin vaikutuksiin. Lisäksi järjestelmän elementtien integraatio on vaatinut huomattavia resursseja. Saatavilla olevien tietojen perusteella järjestelmän aiempien versioiden kehitykseen on käytetty yhteensä 40 miljoonaa Yhdysvaltain dollaria [8], ja seuraavan version (System 2) kehitykseen on myönnetty 7,5 miljoonaa dollaria [9]. Järjestelmän biologisten vaikutuksien tutkimukseen on käytetty 9 miljoonaa dollaria [10]. Järjestelmän ensimmäinen malliversio ADS System 0 esiteltiin vuonna 2001. Vuonna 2002 järjestelmästä esiteltiin liikuteltava versio, jonka jatkokehittely siirrettiin Yhdysvaltojen ACTD-ohjelmaan (Advanced Concept Technology Demonstration) tavoitteena toteuttaa paremmin sotilaskäyttöön soveltuva laite. Amerikkalaiset esittelivät järjestelmäversion ADS System 1 yleisölle tammikuussa 2007 [11]. Tiedonannon mukaan kyseessä on HUMVEE-ajoneuvoon asennettu laite, joka pystyy kohdentamaan ihon nopeasti 50 asteeseen kuumentavaa säteilyä jopa 500 metrin päähän. Vaikutus lakkaa välittömästi kohteen poistuttua säteilykeilasta. Kehityksen seuraava vaihe päättyi syyskuussa 2007, jolloin laajennetun käyttäjäarvioinnin perusteella oli kyetty määrittelemään tarkemmin toimintatapoja sekä kehittämään liikuteltava konttijärjestelmä ADS 2 [12]. Tulevaisuudessa järjestelmää on visioitu käytettäväksi laivoissa, lentokoneissa ja jopa kannettavana versiona käsiaseessa [11]. Kuvassa 5.1 on hahmoteltu järjestelmää.

5.1 Terveysriskeistä

Terveysriskien tutkimuksessa on kartoitettu mm. ihon lämmittämistä, ihosyövän ja lämmittämisen välistä yhteyttä sekä silmien vahingoittumisen mahdollisuutta. Huhtikuussa 2007 raportoitiin järjestelmän testissä sattuneesta onnettomuudesta, jossa koehenkilö sai toisen asteen palovammoja. Samassa tiedotteessa mainittiin, että kyseessä oli vasta toinen hoitoa vaatinut onnettomuus. [12]

Järjestelmän terveysriskien tutkimuksen perusteella on määritetty altistumisen kynnysrajaksi 10 mW/cm^2 (SAR, Specific Absorption Rate). Isompien arvojen tiedetään olevan vahingollisia mm. silmille. Tutkimuksissa on todettu, että 2 W/cm^2:n lämmitysteho riittää vahingoittamaan eläinten silmiä jo muutamassa sekunnissa [13][14]. Järjestelmän toimintataajuus on 95 GHz ja ulostuloteho noin 100 kW [9] sekä esitellyllä System 1:llä että tulossa olevalla System 2:lla. Kattavin yhteenveto



Kuva 5.1: *Piirroskuva autoon asennetusta ADS-järjestelmästä.*

ADS-teknologian vaikutuksista löytyy sivustolta [12].

5.2 Järjestelmän käytöstä

ADS-järjestelmän käyttö voidaan nähdä poliittisesti helpompana vaihtoehtona kuin perinteisen aseellisen voiman käyttö. Käyttökynnys sisäisen turvallisuuden takaamisessa on ADS:llä alhaisempi kuin aseellisilla keinoilla, ja siten se voi tulevaisuudessa teknologian salliessa olla menestyksekäs paitsi sotilaallisesti myös muussa yleisessä järjestyksenpidossa.

Koska saatavan tiedon mukaan riski fyysisille vammoille ADS:n käytössä on erittäin pieni, antaa se aiheen pohtia epäeettisiä käyttömahdollisuuksia kuten sähkömagneettista kidutusta. Järjestelmän käytön seurannaisvaikutukset voivat olla hyvinkin tappavia, vaikka säteily ei niitä aiheutakaan, esimerkiksi mellakassa syntyvä paniikki voi johtaa vakaviin henkilövahinkoihin tallaantumisten muodossa. ADS:n voi toisaalta ajatella olevan psykologinen pelote, jonka olemassaolo jo itsessään estää hulinointia.

5.3 Muita havaintoja

ADS-järjestelmä on pisimmälle kehittynyt julkisuuteen tuotu ”sädease” ihmisiä vastaan, ja se edustaa selvästi uudenlaisen teknologian esiinmarssia turvallisuuden ylläpidossa. Tämän tyyppisten järjestelmien ilmaantuessa on perusteltua seurata tilannetta paitsi pelkän järjestelmän kehityksen osalta, myös sellaisten lähitieteiden osalta, joissa puolueettomasti selvitetään esimerkiksi ihmisen käyttäytymistä sekä

biosähköistä vastetta säteilytykseen.

Kehitettäessä uudentyyppisiä vaikuttamiskeinoja on niiden paitsi oltava tehokkaita myös noudatettava lakeja ja säädöksiä. Lisäksi on syytä varmistaa vaikutuksien turvallisuus mieluummin mallintamalla kuin suoraan koehenkilöitä altistamalla. Altistuskokeissa voidaan käyttää koehenkilöiden lisäksi koe-eläimiä, jolloin on huolehdittava eläinkokeista asetettujen säädöksien noudattamisesta. Muilla kuin ADS:n taajuuksilla tehdyissä tutkimuksissa on myös havaittu ihmisen toimintaan vaikuttavia asioita, kuten muutoksia reaktioajoissa [15], sekä rottien stressin lisääntymistä [16].

6 Raidetykki sähkömagneettisena laukaisulaitteena

6.1 Johdanto

Viime vuosina on alettu kehittää sähkömagneettisia ammusten laukaisulaitteita tavanomaisten kemiallisiin ajoaineesiin perustuvien laukaisulaitteiden korvaajiksi. Yksi tutkituimmista sähkömagneettisista laukaisulaitteista on ns. raidetykki (engl. railgun). Raidetykin toimintaperiaate on ollut tunnettu jo noin 30 vuotta, mutta viime vuosien kehittyminen komponentti- ja materiaaliteknologioissa on lisännyt mielenkiintoa raidetykin sotilaallisia sovelluksia kohtaan.

Raidetykillä on saavutettavissa ammukselle suurempi lähtönopeus kuin tavanomaisilla kemiallisiin ajoaineisiin perustuvilla menetelmillä. Tämä merkitsee raidetykkiä suorasuuntauksella käytettäessä pidempää vaikutusetäisyyttä ja lyhyempää lentoaikaa. Myös tuulen vaikutus ammukseen lennon aikana vähenee. Lisäksi kirjallisuudessa esitetään, että ammukseen ei välttämättä tarvita lainkaan tai niin paljon räjähdysainetta kuin tavanomaisissa ammuksissa, vaan sen tuhovaikutus perustuu kokonaan tai osittain suurempaan liike-energiaan. Kaaritulella ammuttaessa suurempi ammuksen lähtönopeus puolestaan merkitsee pidempää vaikutusetäisyyttä. Kirjallisuudessa esitetään raidetykin vaikutusetäisyydeksi enimmillään noin 500 km:ä. Raidetykkiä voitaisiin näin ollen käyttää jopa ohjusten korvaamiseen. Tällä saavutettaisiin luonnollisesti suuria kustannussäästöjä.

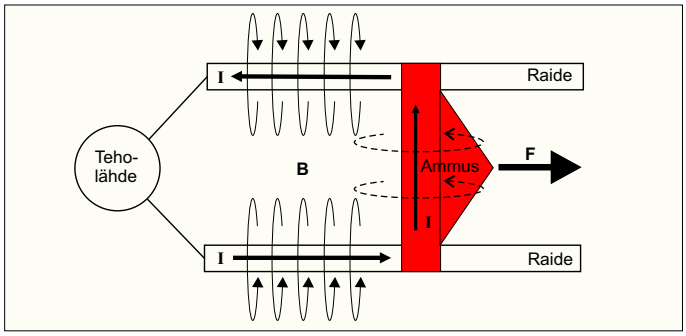
Ajoaineiden puuttuminen ja räjähteiden määrän pieneneminen lisää turvallisuutta esim. aluksilla, jolloin on mahdollista pitää mukana suurempia ammusvarastoja. Tavanomaiseen laukaisulaitteeseen verrattuna raidetykillä on myös se etu, että latausmekanismia on mahdollista yksinkertaistaa, koska ajoaineen lisäämistä ja hylsyn poistoa ei tarvita.

Koska raidetykin käyttämä energia on sähköisessä muodossa, voidaan se integroida alustan kokonaisenergiajärjestelmään [17]. Toisin sanoen alustassa oleva kokonaisteho voidaan jakaa tarpeen mukaan eri toiminnoille kuten liikkumiseen, sensoreille tai asejärjestelmille. Alustalla oleva energia ei näin ollen ole sidottu mihinkään yksittäiseen järjestelmään, vaan sitä voidaan käyttää siellä missä tilanne sitä vaatii.

6.2 Raidetykin toimintaperiaate

Raidetykin toiminta on perusteorialtaan varsin yksinkertainen. Sen peruskomponentit ovat teholähde, kaksi raidetta sekä sähköä johtava ammus, joka on sähköisessä kontaktissa molempiin raiteisiin. Teholähteestä tuleva hyvin suuri virtapulssi johdetaan raiteiden ja ammuksen kautta takaisin lähteeseen, jolloin muodostuu suljettu virtasilmukka. Ampèren lain mukaan sähkövirta synnyttää johteen ympärille

magneettikentän kuvan 7.1 mukaisesti. Koska virta kulkee raiteissa eri suuntiin, silmukan sisällä magneettikentät vahvistavat toisiaan. Magneettikenttä on sitä voimakkaampi, mitä suurempi virta silmukassa kulkee.



Kuva 6.1: *Raidetykin toimintaperiaate.*

Jos magneettikentässä $\vec{B}$ olevassa l:n mittaisessa johtimessa kulkee virta I, vaikuttaa johtimeen Lorentzin voima $\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}$, joka suuntautuu kuvan 7.1 mukaisesti. Koska raiteet on asennettu kiinteästi paikoilleen ja koska ammus pääsee liukumaan raiteilla, saa Lorentzin voima ammuksen kiihtyvään liikkeeseen raiteiden päitä kohti.

Ammuksen lähtönopeus raiteiden päistä voi käytännössä olla muutamia kilometrejä sekunnissa. Tällöin silmukkaan vaaditaan noin 1 T:n suuruinen magneettikenttä, joka puolestaan vaatii muutamien miljoonien ampeerien sähkövirran. Nämä luvut ovat vain suuntaa-antavia, mutta ne antavat kuvaa siitä, missä raidetykkien toteutuksen tekniset haasteet ovat.

On huomattava, että raidetykin toimintaperiaate on erilainen verrattuna myös kirjallisuudessa esiintyvään ja magneettikenttiä hyödyntävään gaussin tykkiin (engl. coilgun). Gaussin tykissä sähkövirta ei kulje ammuksen läpi kuten raidetykissä, vaan ammuksen ympärillä olevassa kelassa, jonka aiheuttama magneettikenttä saa ammuksen kiihtyvään liikkeeseen. Tässä siis ei tarvita sähköä johtavaa kontaktia ammuksen ja teholähteen välille, vaan riittää, että ammus on ferromagneettista ainetta. Ongelmana tässä on kuitenkin mahdollisten ammusmateriaalien ominaisuuksista johtuva magneettinen saturoituminen, jonka vuoksi ammukselle ei saada riittävän suurta lähtönopeutta.

6.3 Raidetykin teknisiä haasteita

Raidetykin toteutuksen keskeisin haaste on raiteiden ja ammuksen välinen rajapinta ja sen mekaaninen kestäminen.

- ammuksen ja raiteiden välinen kitka on oltava pieni
- rajapinnan läpi kulkee mega-ampeerien sähkövirta
- kipinöinnin välttämiseksi kontaktin on oltava pysyvä koko raiteiden mitan
- pienet kontaktipinnat, suuri virrantiheys ja korkea lämpötila
- mahdollisen kipinöinnin raiteisiin aiheuttama eroosio

Nämä haasteet johtavat siihen, että raiteisiin tulee kova mekaaninen rasitus ja ne kuluvat nopeasti. Näin ollen on kiinnitettävä suurta huomiota materiaalivalintoihin (sähkönjohtavuus, lämmönjohtavuus, kitka, eroosionkestävyys), pinnoitteisiin, jäähdytykseen yms. Myös raiteiden riittävän luja kiinnittäminen paikoilleen on haaste niihin kohdistuvan Lorentzin voiman vuoksi. Lisäksi on ratkaistava suuren lämmöntuoton aiheuttama turvallisuusriski henkilöstölle sekä sen lisäämä havaitsemistodennäköisyys vastustajan IR-sensoreissa.

Erityinen haaste on raidetykin tarvitsema suuri hetkellinen teho, jos tykkiä on tarkoitus käyttää liikkuvalla alustalla kuten laivalla. Tämä vaatii alustasta saatavan energian lataamista johonkin välienergiavarastoon, josta laukaisuun tarvittava energia on otettavissa hyvin nopeasti. Välienergiavarastona voidaan käyttää esimerkiksi kondensaattoreita. Ongelmana on kuitenkin niiden tarvitsema suuri tilavuus, minkä vuoksi on kehitetty myös muita energian varastoimismuotoja, kuten kompulsaattorit (vauhtipyörät) sekä akut. Raidetykin soveltaminen liikkuvalla alustalla vaatii hyvin kehittynyttä pulssitehotekniikkaa. [17]

6.4 Raidetykkien kehityksen tämänhetkinen taso

Julkisten lähteiden perusteella näyttää siltä, että selvästi pisimmällä raidetykkien sotilassovellusten tutkimuksessa ollaan Yhdysvaltain laivastossa (US Navy). Heillä kehitetään raidetykkiä sotalaivoihin asennettavaksi yhteistyössä mm. Teksasin yliopiston kanssa. Kehitystyön vaiheesta mainittakoon, että tammikuussa 2007 ammuttiin ensimmäinen koelaukaus, jossa 3,2 kg:n ammus laukaistiin 8 MJ:n lähtöenergialla. Lisäksi raportoitiin, että Teksasin yliopiston laboratoriolaitteistolla pystytään 40 - 60 mm:n ammuksia laukaisemaan rutiininomaisesti 2 MJ:n lähtöenergialla lähtönopeuden ollessa 2,5 km/s [17].

Toistaiseksi tehokkain raportoitu raidetykin koelaukaus tehtiin em. kehitystyöhön liittyen Yhdysvaltain laivaston toimesta tammikuussa 2008 [18]. Kyseessä oli 10,6

MJ:n koelaukaus laitteistolla, joka on suunniteltu tulevaisuudessa 32 MJ:n laukauksiin.

Britanniassa on olemassa tutkimuskäyttöinen 7 MJ:n laitteisto, jossa ammuksen lähtönopeus on 2 km/s [17]. Edellä mainittujen lisäksi raidetykkeihin liittyviä tutkimustuloksia on julkaistu ainakin Kiinasta, Venäjältä ja Israelista. Venäläinen tutkimus näyttää keskittyvän lähinnä maata kiertävälle radalle ammuttavien satelliittien laukaisulaitteistoihin [20]. Samoin NASA tekee tämän kaltaista tutkimusta. Lisäksi mainittakoon ranskalais-saksalainen PEGASUS-laitteisto, joka on tarkoitettu erilaisten luotainten laukaisuun [21].

6.5 Raidetykit tulevaisuudessa

Yhdysvaltojen laivaston kehitystyön tavoitteena on 64 MJ:n lähtöenerginen raidetykki, jossa ammuksen lähtönopeus on 2,5 km/s (eli ammuksen massa on noin 20 kg). Ammuksen kantama on 250 merimailia, ja osumahetkellä ammuksen nopeus on noin 1,5 km/s. Operatiiviseen käyttöön laitteistoa odotetaan vuosina 2015 – 2020. Seuraavana välitavoitteena laivastolla on 32 MJ:n laboratoriolaitteisto, jonka raportoidaan olevan toistaiseksi suurin olemassa oleva raidetykki [17]. Edellä mainittu tammikuun 2008 koelaukaus tehtiin juuri tällä laitteistolla. Yhdysvaltain laivaston raidetykkihankkeesta on tietoa lähteessä [19]. Yhdysvaltojen maavoimilla (US Army) puolestaan on kehitteillä 2 MJ:n laite, jonka energiavarastona käytetään pulssitettua alternaattoriratkaisua [22].

Kaiken kaikkiaan on todettava, että raidetykkien hetkellisesti tarvitsema teho on niin suuri, että näköpiirissä olevilla tekniikoilla niiden toteuttaminen on järkevää liikkuvista alustoista ainoastaan isoihin sotalaivoihin tai tankkeihin. Karkeasti voi arvioida, että 10 MJ:n energia kondensaattoreihin varastoituna vie tilaa noin 15 m^3 ja painaa 5000 kg:n luokkaa. Tällä voidaan saavuttaa ammukselle noin 6 MJ:n lähtöenergia, mikä tarkoittaa 10 kg:n ammukselle maksimissaan noin 1 km/s:n lähtönopeutta.

Tulevaisuuden raidetykeistä on kirjallisuudessa esitetty muun muassa, että ammuksia tullaan paremman osumatarkkuuden vuoksi varustamaan omalla ohjausjärjestelmällä, joka esimerkiksi GPS:n perusteella ja joidenkin siivekkeiden tms. avulla korjaisi lentorataansa. Tällaisen kehityssuunnan mielekkyys on tosin kyseenalainen, sillä ammuksen erittäin suuri lähtökiihtyvyys asettaa mukaan asennettavalle elektroniikalle todella korkeat kestävyysvaatimukset. Tämä väistämättä nostaa merkittävästi ammusten hintaa, mikä vie pohjaa siltä perustelulta, että raidetykeillä saavutetaan kustannussäästöjä tavanomaisesti käytettäviin ohjuksiin verrattuna.

7 Tienvarsipommien radiolaukaisu

Ympäri maailman terroristien käytössä jo pitkään olleet radioteknisesti etälaukaistavat improvisoidut pommit (IED, Improvised Explosive Device) yleistyivät Irakissa ja Afganistanissa nopeasti jokunen vuosi sitten. IED-pommit on tyypillisesti sijoitettu tien laitaan ja suunnattu ajoneuvoja vastaan, minkä vuoksi usein puhutaan yksinkertaisesti tienvarsipommeista. Tähysteisten, tiettyyn paikkaan asennettujen improvisoitujen pommien lisäksi radiolaukaisua käytetään miinan kaltaisten IED-laitteiden (VOIED, Victim Operated IED) virittämiseen sekä itsemurhaiskujen varmistamiseen.

Vastatoimien käyttöönoton myötä radioteknisesti laukaistavien improvisoitujen pommien (RCIED, Radio-Controlled IED) osuus kaikista tienvarsipommeista on pienentynyt pysyen kuitenkin koko ajan merkittävänä. Koska vastatoimia voidaan aina jossain määrin kiertää, on hyvinkin mahdollista, että RCIED-tapausten määrä voi kääntyä uudelleen nousuun tulevina vuosina. Lisäksi on hyvä muistaa, että myös siviiliyhteiskunnassa on paljon kohteita, joissa radiolaukaisun vastatoimet on syytä ottaa huomioon.

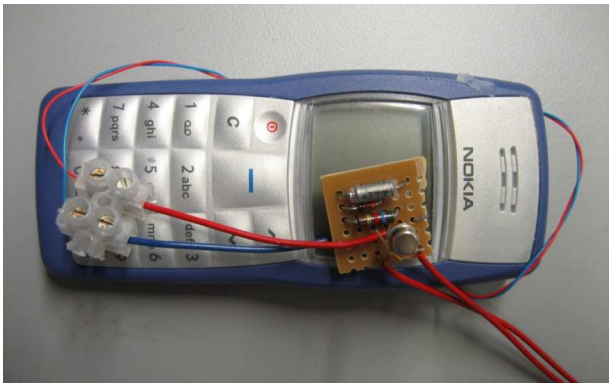
7.1 Radiolaukaisun edut ja haitat

Tienvarsipommien etälaukaisu mahdollistaa toimintatavan, jossa laukaisija seuraa tilannetta turvallisen etäisyyden päästä ja laukaisee pommin juuri haluamallaan hetkellä. Perinteisesti laukaisusignaalin välittämiseen on käytetty kaapelia (CWIED, Command Wire IED), mikä onkin yksinkertainen, luotettava ja halpa ratkaisu. Radiolaukaisu tarjoaa kaapelilaukaisuun nähden kuitenkin useita lisäetuja. Turvallisen laukaisuetäisyyden ja laukaisun tarkan ajoittamisen lisäksi pommin asettaminen on nopeaa ja kätkeminen helppoa. Lisäksi laukaisupaikka on valittavissa vapaasti ja tarvittaessa vaihdettavissa. Erilaisia teknisiä toteutusvaihtoehtoja on käytännössä lukemattomia ja tarvikkeita helposti saatavilla. Ilmeisinä radiolaukaisun haittoina voidaan pitää akkukäyttöisen laitteen rajallista valmiusaikaa, mikä tosin voi olla suhteellisen pitkäkin, ja erityisesti menetelmän häirittävyyttä. Kaapelilaukaisuun verrattuna radiolaukaisu voi myös olla epäluotettavampi ja alttiimpi sään vaikutuksille.

7.2 Radiolaukaisun toteuttaminen

Improvisoituun radiolaukaisuun tarvitaan vähimmillän vain kytkin pommin laukaisupiiriin ja laukaisusignaalin välittämiseksi jokin sopiva lähetin–vastaanotin-pari. Tähän käyttöön suoraan sovellettavissa ovat esimerkiksi radio-ohjattava lelu tai pi-

havalojen ohjaamiseen käytettävä kauko-ohjausjärjestelmä. Yleensä ei päästä kuitenkaan näin vähällä, vaan vastaanottimen ja kytkimen välille on rakennettava hieman lisäelektroniikkaa. Yksinkertainen esimerkki on kuvan 7.1 ratkaisu, jonka toteuttamiseen riittää elektroniikan perusteiden tuntemus, ainakin jos on valmiit ohjeet. Komponentit kuvan laitteeseen olisi voinut tarvittaessa purkaa esimerkiksi matkaradiosta. Käytännössä todella luotettavan ja tarkan laukaisujärjestelmän suunnittelu (ja ehkä rakentaminenkin) edellyttää mainittua esimerkkiä enemmän elektroniikan osaamista.



Kuva 7.1: *Improvisoitu radiolaukaisin.*

Virheilmaisun ja sitä kautta väärään aikaan tapahtuvan laukaisun estämiseksi järjestelmässä voi olla jokin koodaus. Joissain laitteissa koodaus on sisäänrakennettuna (esimerkiksi autotallin oven kauko-ohjain), joihinkin se on rakennettavissa jälkikäteen. Pommin asettaja voi lisäksi suojata itsensä käyttämällä ajastinta, joka aktivoi etälaukaisun vasta jonkin ajan kuluttua asettamishetkestä.

Useimmiten radiolaukaisuun on käytetty sekä Irakissa ja Afganistanissa että terroriiskuissa ympäri maailman GSM-, LRCT- (Long Range Cordless Telephone, eivät luvallisia Suomessa) sekä erilaisia radiopuhelimia [23],[24]. Kaikkia näitä on helppo hankkia ja melko helppo soveltaa käyttöön. Myös monet muut laitteet ovat kohtalaisen helposti valjastettavissa etälaukaisukäyttöön, esimerkiksi jo mainitut radio-ohjatut lelut sekä erilaiset kauko-ohjatut lukitusjärjestelmät (KES, Keyless Entry Systems, esim. autotallin oven avaaja). Lisäksi on olemassa monia muita improvisoituun etälaukaisuun soveltuvia radiolaitteita, joita ei ole vielä suuressa määrin tai ollenkaan käytetty. Joitakin esimerkkejä on koottu taulukkoon 7.1.

Etälaukaisuun tarvittavan radiolinkin rakentaminen täysin itse vapauttaisi pommin tekijän kaupallisten laitteiden teho- ja taajuusrajoituksista. Tämä kuitenkin edel-

Taulukko 7.1: *Esimerkkejä etälaukaisuun soveltuvista laitteista.*

Laite	**Taajuus**	**Kantama**
radiotaajuiset kaukosäätimet	n. 315 MHz, n. 430 MHz,	n. 200 m
radiopuhelimet	n. 150 MHz, n. 400-480 MHz	muutama km
matkapuhelimet	n. 900 MHz, n. 1,8 GHz	muutama km
Bluetooth tms.	n. 2,4 GHz	n. 100 m

lyttää yleisesti ottaen hyvää elektroniikan ja radiotekniikan osaamista sekä erityisiä mittalaitteita. Jos toimintataajuus on korkeintaan muutama kymmenen MHz, edistynyt alan harrastaja kykenee suunnittelemaan ja rakentamaan tarvittavan yksinkertaisen lähetin–vastaantotin-parin.

7.3 Häirintä vastatoimena

Radiolaukaisun aktiivinen vastatoimi on häirintä, jonka perusajatuksena on peittää laukaisusignaali sitä voimakkaamman häirintäsignaalin alle. Koska häirintätehoa ei ole käytössä rajattomasti, vain osaa kaikista mahdollisista taajuuksista voidaan häiritä. Täydellistä suojaa ei siis voida saavuttaa, koska paraskaan tiedustelutieto ei takaa että tulevaisuus on ennustettu täysin oikein. Erilaisia häirintäjärjestelmiä on nykyään ostettavissa sekä sotilas- että siviilikäyttöön useilta eri valmistajilta.

Vaikka mahdollisesti RCIED:issä käytettävien kaupallisten laitteiden toimintataajuudet periaatteessa tiedetään, vastatoimia hankaloittaa taajuuksien laaja kirjo. Syynä tähän on tietenkin erilaisten laitteiden määrä, mutta myös kansainvälinen taajuusjako, jossa eri puolilla maailmaa vastaavat laitteet toimivat useinkin eri taajuusalueilla. Kaikkiin näihin on käytännössä varauduttava, koska nykyään laitteiden hankkiminen mistä päin maailmaa tahansa on helppoa (esim. tilaamalla Internetistä).

Jos häirintä toimii ja on kohdistettu oikein, muodostuu häirintälähettimen ympärille ”suojakupla”, jonka sisällä RCIED ei laukea. Kuplan koko riippuu oleellisesti häirintätehosta, IED:n lähettimen tehosta sekä näiden suhteellisista etäisyyksistä pommin vastaanottimesta. Etäisyyksien lisäksi vastaanotetut suhteelliset tehot voivat pienentyä eri radioteillä vaikuttavien erilaisten etenemisvaimennuksien (riippuvat mm. maastosta ja rakennuksista) sekä heijastusten vuoksi. Lisäksi se, kuinka paljon suurempi häirintätehon on laukaisusignaaliin nähden oltava, voi vaihdella suuresti.

Käytettävissä olevan tehon lisäksi häirintää rajoittavat eräät muutkin tekijät. Ensinnäksin häiritsijän on otettava huomioon omat kriittiset järjestelmät (esimerkiksi oma viestiliikenne) sekä ympäröivän yhteiskunnan järjestelmät, jotka eivät saa häiriytyä (esimerkiksi sairaaloissa). Usein myös lainsäädäntö ja muut sopimukset rajoittavat häirintämahdollisuuksia, samoin kuin suhteet sivullisiin. Esimerkiksi matkapuhelinverkon sulkeminen olisi tehokas vastatoimi kännykkä-RCIED:lle, mutta kynnys siihen on korkea siviiliväestölle aiheutuvan haitan vuoksi.

7.4 Johtopäätökset

Kiistattomien etujensa vuoksi radiolaukaisun käyttö improvisoiduissa pommeissa on tullut jäädäkseen. Erityisesti fyysisen linkin puuttuminen tekee menetelmästä monessa tapauksessa kaapelilaukaisua houkuttelevamman. Halpojen kaupallisten radiolaitteiden avulla radiolaukaisun toteuttaminen on periaatteessa melko helppoa, mutta elektroniikan osaamista tarvitaan laitteiden suunnittelussa ja rakentamisessa. RCIED:n vastatoimena aktiivinen häirintä ei valitettavasti ole käytännössä ongelmatonta rajallisen häirintätehon vuoksi.

8 Yhteenveto

Sähkömagneettisten aseiden muodostama uhka näyttää tällä hetkellä olevan voimakkaassa muutoksessa. Sekä sotilaallisten että siviiliyhteiskunnan toimintojen kannalta joudutaan tulevaisuudessa ottamaan huomioon uudentyyppisiä ja alati muuttuvia tilanteita. Uusia aseita ja aseteknologioita kehitellään rinnakkaisesti usealla taholla, ja alan seuraaminen tulee entistä tärkeämmäksi kokonaisturvallisuuden ylläpidossa.

Pyrittäessä suojaamaan laitteistoja tahalliselta häirinnältä (IEMI) on oleellista niiden sijoittelut, rakenteet, materiaalivalinnat sekä laitetiloihin pääsyn rajoittaminen. IEMI:ltä suojautumisessa keskeistä on ymmärtää kokonaisuuden merkitys eli se, että laitteiden käyttötavat sekä niitä ympäröivien kotelointien ja käyttötilojen yhdessä muodostama kokonaissuoja on ratkaiseva. Niinpä suoja paranee esimerkiksi estämällä asiattomien pääsy kohteiden lähialueille sekä noudattamalla asianmukaisia toimintatapoja laitteita käytettäessä.

Sähkömagneettinen pulssi (EMP) voi syntyä paitsi ydinräjähdyksessä myös esimerkiksi salamoinnin yhteydessä. Ilmiön vaikutuksien arviointi on uusimpien teknologisten sovelluksien yhteydessä edelleenkin ajankohtaista ja tärkeää. Yleisemminkin IEMI:ltä ja EMP:ltä suojautumisen kannalta perinteisten suojausteknologioiden lisäksi on syytä seurata uusien innovaatioiden luomien mahdollisuuksien realisoitumista.

Suuritehoisten mikroaaltoaseiden (HPM) käyttöä rajoittaa tavallisesti niiden suuri koko. Tämä ei kuitenkaan välttämättä ole ongelma esimerkiksi laivoissa, joiden omasuojaa HPM-ase voi täydentää. Myös lähellä rannikkoa olevalta laivalta HPM-aseen käyttäminen maalla olevia kohteita vastaan voisi olla mahdollista. Toisaalta räjähde–HPM-ase on suhteellisen pienikokoinen ja kertakäyttöisenä voidaan kuljettaa kohteen lähelle esimerkiksi ohjukseen asennettuna. On myös mahdollista, että HPM-tyyppistä asetta käytetään terrorismin välineenä lamauttamaan yhteiskunnan kannalta merkittävää infrastruktuuria. Tämäntyyppinen uhka on ehkä jopa todennäköisempi kuin suoranainen sotilaallinen uhka. HPM-aseen terroristikäyttöön varautumiseen ja ennen kaikkea käytön mahdollisuuden tiedostamiseen eri yhteiskuntatahojen piirissä tulee kiinnittää huomiota.

ADS-lamautusaseen käyttö lisää mahdollisuuksia paitsi sotilaallisten kohteiden suojaamiseen myös esimerkiksi mellakoiden rauhoittamiseen. Teknologian kehittymisen myötä järjestelmä tullee laajemmin myös operatiiviseen käyttöön muutaman vuoden kuluessa.

Sähkömagneettisista laukaisulaitteistoista raidetykki on kehitetty demonstraattorivaiheeseen viime vuosina erityisesti Yhdysvalloissa. Raidetykillä on saavutettavissa suorituskykyetuja tavanomaisiin ajoaineisiin perustuviin järjestelmiin verrattuna.

Radiolaukaistavat improvisoidut pommit (RCIED) ovat muodostuneet uudeksi haasteeksi toimittaessa kriisialueilla. Tämä RCIED-uhka ulottuu terrorismin muodossa myös siviiliyhteiskuntaan, ja siihen varautuminen on radiolaukaisutapojen monimuotoisuuden vuoksi hyvin vaikeaa.

Viitteet

[1] C. L. Longmire. *On the Electromagnetic Pulse Produced by nuclear Explosions.* IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 26, No. 1, January 1978, pp. 3-13.

[2] C. E. Baum. *From the electromagnetic pulse to high-power electromagnetics.* Proceedings of the IEEE, Vol. 80, No. 6, June 1992, pp. 789-817.

[3] Dr. Rabindra ja N. Ghose. *EMP Environment and Systems Hardness design.* Don White Consultants Inc., 1986.

[4] V. J. Kruse, D. J. Nickel, E. R. Taylor, J. J. Bonk ja P. R. Barnes. *Impacts of a nominal nuclear electromagnetic pulse on electric power systems: a probabilistic approach.* IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 3, July 1991, pp. 1251-1263.

[5] J. Kosola ja T. Solante. *Digitaalinen Taistelukenttä – Informaatioajan sotakoneen tekniikka.* Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, Julkaisusarja 1 n:o 13 toinen painos. Helsinki 2003.

[6] D. V. Giri. *High-Power-Electromagnetics, Nonlethal Weapons and Applications.* Harvard University press, 2004.

[7] D. V. Giri. *HPE Environments, Classification of Intentional Electromagnetic Interference (IEMI) Based on Bandwidth* . Directed Energy Weapons 2006, Master Class.

[8] http://www.globalsecurity.org/military/systems/grounds/v-mads.htm, viitattu 29.1.2007.

[9] In Brief - US Air Force orders Active Denial System, Jane's Defence Weekly - May 25, 2005.

[10] http://www.technovelgy.com/ct/Science-Fiction_News.asp?NewsNum=420, viitattu 18.1.2007.

[11] https://www.jnlwp.com/ActiveDenialSystem.asp, viitattu 9.8.2007.

[12] https://www.jnlwp.com/ads.asp, viitattu 10.12.2008.

[13] S. Chalfin, J. A. D'Andrea, P. D. Comeau, M. E. Belt ja D. J. Hatcher. *Millimeter wave absorbtion in the nonhuman primate eye at 35 GHz and 94 GHz.* Health Physics, 83(1), 2002, pp. 83-90.

[14] K. R. Foster, J. A. D'Andrea, S. Chalfin ja D. J. Hatcher. *Thermal modelling of millimeter wave damage to the primate cornea at 35 GHz and 94 GHz.* Health Physics, 84(6), 2003, pp. 764-769.

[15] C. M. Cook, A. W. Thomas ja F. S. Prato. *Human Electrophysiological and Cognitive Effects of Exposure to ELF Magnetic and ELF modulated RF and Microwave Fields.* A Review of Recent Studies. Bioelectromagnetics 23, 2002, pp. 144-157.

[16] T. J. Walters, K. L. Ryan, M. R. Tehrany, M. B. Jones, L. A. Paulus ja P. A. Mason. *HSP70 expression in the CNS in response to exercise and heat stress in rats.* Journal of Applied Physiology, 84, 1998, pp. 1269-1277.

[17] I. R. McNab ja F. C. Beach. *Naval Railguns.* IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 1, January 2007, pp. 463-468.

[18] http://www.technologyreview.com/Infotech/20164/?nlid=857&a=f, viitattu 25.7.2008.

[19] http://www.nswc.navy.mil/ET/railgun/index.html, viitattu 25.7.2008.

[20] G. A. Shevtsov, P. G. Rutberg ja A. V. Budin. *Overview of Some Recent EML Research in Russia.* IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 1, January 2007, pp. 99-106.

[21] B. Reck, P. Lehmann, W. Wenning ja M. D. Vo. *Projectiles With Rod-Shaped Payloads for the PEGASUS Railgun.* IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 1, January 2007.

[22] H. D. Fair. *Progress in Electromagnetic Launch Science and Technology.* IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 1, January 2007, pp. 93-98.

[23] Schactman Noah. *Improvised Bombs Baffle Army.* http://www.wired.com/print/science/discoveries/news/2005/01/66395, viitattu 16.7.2007.

[24] http://www.defenselink.mil/news/newsarticle.asp?id=14542, *Iraqi, Coalition Troops Capture Terrorists, Weapons.* American Forces Press Service, viitattu 3.7.2007.

ISBN 978-951-25-1991-0 (nid)
ISBN 978-951-25-1994-1 (PDF)
ISSN 1457-3938

Puolustusvoimien
Teknillinen Tutkimuslaitos
PL 10
11311 Riihimäki
Suomi ▸ Finland

▸ www.puolustusvoimat.fi