



Förstudie elektromagnetiska vapen, HPM-vapen

TOMAS HURTIG, STEN E. NYHOLM, MATTIAS ELFSBERG

Tomas Hurtig, Sten E. Nyholm, Mattias Elfsberg

Förstudie elektromagnetiska vapen, HPM-vapen

Titel	Förstudie elektromagnetiska vapen, HPM-vapen
Title	Pilot study on electromagnetic weapons, HPM-weapons
Rapportnr/Report no	FOI-R--4887--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2019
Antal sidor/Pages	26
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarmakten
Forskningsområde	Vapen, Skydd och säkerhet
FoT-område	Vapen och skydd
Projektnr/Project no	E60948
Godkänd av/Approved by	Torgny Carlsson
Ansvarig avdelning	Försvars- och säkerhetssystem

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI

Sammanfattning

Dagens och morgondagens vapen- och skyddssystem blir allt mer beroende av sensorer, datorer och elektroniska systemkomponenter för sin funktion. Dessutom är trådlös kommunikation mellan olika förbandsenheter och med ledningsstab viktig för en fullt ut fungerande taktisk och operativ förmåga. Teknologiområdet mikrovågsvapen, HPM (eng. High Power Microwave), som idag är under framväxt, behandlar teknologier för att generera elektromagnetiska pulser med hög toppeffekt som temporärt eller permanent kan försätta elektroniken i bestrålade objekt ur funktion.

Denna förstudie ger en kort genomgång av de viktigaste komponenterna för att konstruera ett HPM-vapen, nämligen strålkälla, antenn och högspänningspulsaggregat. En sammanfattning av tidigare HPM-vapenstudier samt en blick på omvärldsutvecklingen och möjliga internationella samarbetspartners ger tillsammans med en diskussion om möjliga verkansavstånd en bakgrund till ett framtaget förslag till forskningsplan för ett nytt HPM-vapenprojekt med inriktning mot hur taktiskt användbara HPM-vapen på några olika plattformar skulle kunna konstrueras.

Nyckelord: HPM-vapen, mikrovågsvapen, forskningsplan, plattformsinTEGRERING.

Summary

The weapons and protection systems of today and tomorrow are becoming increasingly dependent on sensors, computers, and other electronic system components for their operation. Furthermore, wireless communications between different military units and command staff is important for full tactical and operational capability. The technology area High Power Microwave (HPM) weapons, which is emerging today, concerns generation of electromagnetic pulses with high peak power, which temporarily or permanently can disable the electronics in irradiated objects.

This pre-study gives a brief overview of the most important for construction of an HPM weapon: radiation source, antenna, and high voltage pulsed power supply. A summary of earlier HPM weapon studies with a perspective on international development and possible international collaborations together with a discussion on possible distances for effects gives a background to a proposal for a research plan for a new HPM weapons project aiming at construction of tactically useable HPM weapons for some different platforms.

Keywords: HPM weapons, microwave weapons, research plan, platform integration.

Innehållsförteckning

1.	Inledning	7
2.	HPM-teknologier.....	8
2.1	Strålkällor	9
2.1.1	Virkator	10
2.1.2	Magnetron.....	11
2.1.3	MILO	11
2.1.4	Reltron	11
2.2	Antenn	12
2.3	Pulsaggregat	13
3.	Tidigare FOI-verksamhet rörande HPM-vapen	16
4.	Omvärldsutveckling inom HPM-vapen	16
5.	Möjliga internationella samarbeten inom HPM-vapen	17
6.	Möjliga verkansavstånd för olika typer av vapensystem och mål.....	18
6.1	Strålningslobens inverkan.....	21
7.	Förslag till forskningsplan.....	23
7.1	Övergripande plan och forskningsfrågeställningar.....	23
7.2	Bemannning och budgetering.....	24
7.3	Resultatöverföring	24
	Referenser	25

1. Inledning

Dagens och morgondagens vapen- och skyddssystem blir allt mer beroende av sensorer, datorer och elektroniska systemkomponenter för sin funktion. Dessutom är trådlös kommunikation mellan olika förbandsenheter och med ledningsstab viktig för en fullt ut fungerande taktisk och operativ förmåga. Teknologiområdet mikrovågsvapen, HPM (eng. High Power Microwave), som idag är under framväxt, behandlar teknologier för att generera elektromagnetiska pulser med hög toppeffekt som temporärt eller permanent kan försätta elektroniken i bestrålade objekt ur funktion.

Det som skiljer HPM från andra typer av elektronisk attack, t.ex. störsändare och vilseledande signalering, är möjligheten till permanent fysisk förstörelse av elektronisk utrustning samt möjligheten att störa/förstöra även icke kommunicerande elektroniska system genom inkoppling av energi via kablage eller direkt in på kretskort och halvledarkomponenter.

Det existerar flera skilda teknologiska lösningar för att generera HPM-pulser. De flesta konstruktioner av HPM-källor baseras på utveckling av tidigare befintlig teknik för bredbandig kommunikation eller radarapplikationer. Man kan särskilja mellan tre huvudklasser av HPM-vapentechnologier [1]:

- Smalbandiga källor (eng. narrowband (NB) eller Hypoband)
- Bredbandiga källor (eng. damped sinusoid (DS), broadband, wideband eller Mesoband)
- Extremt bredbandiga källor (eng. ultra-wideband (UWB) eller Hyperband)

Dessa kan sedan delas in ytterligare efter strålningens bandbredd och efter den genererade strålningspulsens varaktighet [2].

För att åstadkomma verkan i ett elektroniskt objekt eller system måste det finnas inkopplingsvägar så att den genererade elektromagnetiska energin kan ta sig in och störa eller förstöra känslig elektronik. Det finns två huvudsakliga inkopplingsvägar:

- Framvägskoppling
Innebär att energin kopplas in via en antenn på ett radiokommunicerande system
 - Inombands framvägskoppling innebär att inkopplingen sker inom det frekvensband som utrustningen själv använder för kommunikation.
 - Utombands framvägskoppling innebär att inkopplingen sker genom systemets antenn men vid en annan frekvens än den som systemet själv använder för kommunikation.
- Bakvägskoppling
Innebär att energin kopplas in via oavsiktliga antenner¹, t.ex. anslutna kablar, direkt in på kretskortens ledningsbanor eller via sensorer.

Vidare kan verkansmekanismerna delas in i störande och förstörande verkan för vilka det finns olika standarder för klassificering. Graden av verkan kan hänföras till påverkan på olika delsystem eller kompletta systems förmåga att utföra en huvuduppgift. Enligt "NATO levels for radiated testing" [3] delas verkan in i fyra huvudgrupper enligt:

- | | |
|----|--|
| 0 | Not under test |
| 1 | No observed effect |
| 2 | Interference while radiated |
| 3 | Strong interference/crash, self-recovery |
| 4 | Loss of function, operator-intervention |
| a. | Restarted by pressing on turn-on switch |
| b. | Restarted by taking out/putting in battery |

¹ Ordet "antenn" används här i vid mening. T.ex. kan en optisk eller IR-sensor, där man har ett sensorelement bakom en lins, vara känslig för mikrovågsstrålning. I detta fall kan linsen betraktas som en öppning som mikrovågorna passerar igenom och sensorelementet, med ledningar kopplade till bakomliggande elektronik, fungerar som en antenn och plockar upp mikrovågsstrålningen som inducerar en strömpuls i elektroniken.

En annan nu vanlig klassificeringsmetod för HPM-verkan återges i IEC-standard TS 61000-5-9 [4], som dels specificerar verkan avseende påverkan på kritisk funktionalitet (från ingen effekt via störning till fullständig funktionsförlust) och dels avseende verkans varaktighet (från verkan endast under pågående bestrålning till permanent skada som kräver utbyte av komponenter eller ominstallation av mjukvara).

Baserat på den provning som utförts vid FOI och den provning som finns redovisad i öppen litteratur går det att dra följande slutsatser vad gäller skillnaden mellan störande och förstörande verkan och hur ett HPM-vapen bör utformas för att åstadkomma störande och/eller förstörande verkan:

- För att åstadkomma störande verkan är en hög pulsrepetitionsfrekvens av stor vikt då det ökar möjligheten att koppla in energin under en känslig del av målsystemets interna arbetscykel.
- Förstörande verkan kräver energi och sker vid den första puls som kopplar in i systemet på ett effektivt sätt. Det kan ändå vara värdefullt att kunna skicka många pulser då detta ökar chansen att koppla in energi ur flera olika vinklar om målet och vapnet rör sig i förhållande till varandra.

Den genererade strålningens frekvens är central både vid störande och förstörande verkan då olika frekvenser kommer att koppla in olika effektivt i olika mål. För vissa typer av mål, t.ex. radiosystem med känd arbetsfrekvens, är det ofta mest effektivt att designa HPM-vapnet för att generera just målets arbetsfrekvens. För andra mål kan det vara mer effektivt att kunna generera en serie strålningspulser med olika frekvens eller flera olika pulståg med olika strålfrekvens för att öka möjligheten till effektiv inkoppling. Det har dock visat sig mycket svårt att kombinera mycket hög uteffekt med möjligheten att variera den genererade frekvensen. God kännedom om målet och dess egenskaper (typ av elektronik, arbetsfrekvenser, klockcykler, etc.) ökar avsevärt möjligheten att designa ett effektivt HPM-vapen mot denna typ av målobjekt.

2. HPM-teknologier

Ett komplett HPM-system består av någon typ av primär energikälla som kan förse systemet med elektrisk kraft, en strålkälla som genererar mikrovågspulser, samt ofta någon typ av antenn för att kunna rikta strålningspulserna mot ett målobjekt. Även om toppeffekten hos den genererade strålningen ofta är mycket hög är pulserna korta och tiden mellan pulser är ofta förhållandevis lång vilket innebär att den medeleffekt som ett HPM-system behöver kan tillgodoses på de flesta motoriserade plattformar.

Aktuella strålkällor drivs i stort sett uteslutande av högspänning i mycket korta pulser varför ett system för högspänningsgenerering och pulsformning behövs. För stora system med uteffekter om hundratals megawatt blir detta ofta den tyngsta och mest skrymmande enheten. Massa och volym hos själva strålkällan bestäms i huvudsak av val av teknologi. Vissa strålkällor behöver ett externt genererat magnetfält för att hålla ihop elektronstrålen; detta magnetfält genereras ofta med hjälp av elektriska spolar som då behöver ett separat pulsaggregat, vilket ökar vikt och volym hos systemet. På senare år har nya magnetmaterial gjort att vissa strålkällor (t.ex. magnetroner) kan nyttja permanentmagneter vilket minskar nödvändig volym och ökar systemets totala verkningsgrad.

För att rikta strålningen mot målet behövs även någon typ av antenn och trots att en hel del forskning ägnats åt specialkonstruerade antenner för mycket höga uteffekter är de typer som faktiskt kommit till användning ofta av ganska traditionell typ. Olika typer av hornkonstruktioner är enkla och erbjuder viss bandbredd men är skrymmande, gruppantenner av typen läckande vågledare erbjuder mer kompakta lösningar för en given antennförstärkning.

2.1 Strålkällor

Strålkällan i ett HPM-vapen bör, för att vara taktiskt användbar, uppfylla ett antal krav:

- Verkan ska kunna åstadkommas mot ett flertal olika målobjekt
- Verkansavstånd bör, beroende på målobjekt och taktisk situation, vara av storleksordningen tiotalet till hundratals meter för förstörande verkan och av storleksordningen hundratalet meter till kilometeravstånd för störande verkan
- Verkan ska kunna riktas för att undvika effekter på andra objekt i närheten av det tilltänkta målet (kan uppnås med riktantenn eller genom att vapnet levereras nära målobjektet)
- Vapnet ska kunna användas flera gånger mot olika mål utan att man behöver byta ut komponenter eller vidta manuella återställningsåtgärder
- Strålkällan och andra komponenter i HPM-vapnet ska vara så robusta att de klarar den miljö, med temperaturvariationer samt vibrationer och accelerationer, de kan utsättas för på den avsedda plattformen utan att prestanda försämras vid normal användning.

Historiskt har HPM-vapen sin upprinnelse i de kärnvapentester som genomfördes på 1960-talet (se t.ex. Starfish Prime [5]) när man upptäckte att dessa ibland åtföljdes av en kraftig elektromagnetisk puls (EMP) som slog ut kommunikation och elförsörjning över stora områden. Den elektromagnetiska kopplingen skedde till stora strukturer som kraftledningar och järnvägsräls. Både i USA och Sovjetunionen inleddes redan på 60-talet försök att generera EMP-liknande pulser utan kärnvapen men med explosivämnesdrivna generatorer (bl.a. av Andrej Sacharov i Sovjet och Max Fowler i USA) [6]. Man tänkte sig oftast en enstaka kraftig EM-puls som verkade över ett mindre område, t.ex. ett slagfält. Många koncept använde explosivämnen som primär energikälla eftersom dessa kan frigöra en stor mängd energi på kort tid. En bråkdel av denna energi skulle användas för att generera en kraftig elektrisk strömpuls som omvandlas till elektromagnetisk (EM) strålning i någon typ av strålkälla. Bland de anordningar som utvecklades fanns explosivämnesdrivna generatorer i form av strömspolar, linjäracceleratorer, etc. Strålkällan var ofta en enkel konstruktion, som en modifierad dipol eller spiralantenn, men kunde också vara en mikrovågskavitet, men det senare krävde en anordning för att omvandla en kraftig strömpuls till en högspänningspuls som kunde driva mikrovågsgenereringar.

Många varianter av explosivämnesdrivna anordningar har testats på flera håll i världen under gångna decennier. En nackdel med explosivämnesdrivna EM-pulskällor är att de är av engångskaraktär och ofta förstör strålkällan och övriga komponenter. Det har ofta visat sig svårt att kunna generera högre frekvenser och anpassa strålningens frekvensinnehåll för att uppnå effektiv verkan mot elektronikobjekt som är mindre än kilometerlånga kraftledningar. Flertalet explosivämnesdrivna EM-pulskällor är rundstrålande utan inriktningsmöjligheter för strålningen. Undersökningar av strålningen från explosivämnesdrivna HPM-källor har visat att dessa endast genererar måttliga strålningsnivåer på rimliga avstånd med ingen eller svag verkan mot flertalet intressanta målobjekt [7].

I takt med att teknik för elektrisk energilagring utvecklats så har rent elektrisk drivning av strålkällor blivit allt intressantare för vapentillämpning. Batterier och kondensatorer med hög energidensitet och förmåga att snabbt leverera en kraftig elektrisk puls från en begränsad volym och massa möjliggör realisering av flertalet tillämpningar. Elektrisk framdrivning av stridsfordon behöver avsevärt större mängd tillgänglig elektrisk energi än vad ett pulsat HPM-vapen behöver för att generera en serie EM-pulser, vilket innebär att en mindre del av tillgänglig elektrisk kapacitet räcker för att försörja ett HPM-vapen på ett helelektrifierat stridsfordon [8].

Utvecklingen av mikrovågskällor har medfört att det finns många olika konstruktioner, med olika krav på spänningsnivå och pulsform, som är möjliga för HPM-generering [9]. Bland de mest intressanta är smalbandiga källor som kan avstämmas i frekvens över ett visst frekvensintervall (i vissa fall upp till en oktav) och som kan leverera en mycket hög toppeffekt. Andra strålkällor är mycket bredbandiga, dvs. täcker alla frekvenser inom ett brett frekvensintervall (flera oktaver, t.ex. 100 MHz - 3 GHz). Nackdelen med de senare är att pulsenergin sprids ut över ett stort antal frekvenser, vilket innebär att en mindre del av energin kopplar in till ett givet målobjekt via de få frekvenser för vilka just det objektet är känsligt. Fördelen är givetvis att det inte krävs någon anpassning av genererad puls till ett specifikt målobjekt. Till denna senare grupp av HPM-källor räknas bredbandiga källor (som genererar en dämpad sinusvåg, s.k. DS-källor) och extremt bredbandiga källor (eng. "Ultra-Wide Band", s.k. UWB-källor). Dessa är i första

hand kraftiga störkällor, medan smalbandiga källor kan ha potential att även förstöra elektronisk utrustning förutsatt att frekvensen anpassats till målobjektet.

Möjligheterna att pulsa en strålkälla repetitivt (t.ex. med 10-100 Hz) tillsammans med avstämbarhet inom ett frekvensintervall gör det intressant att försöka generera en skur av mikrovågspulser av olika frekvens. Syftet är att öka sannolikheten för att någon av de genererade pulserna har en frekvens som kopplar in till elektronikkomponenter i ett målobjekt med okänd känslighetsprofil och där åstadkommer störande eller förstörande verkan. Om det är känt att det aktuella målobjektet är sårbart vid en eller flera bestämda frekvenser bör man givetvis anpassa genererade pulser till dessa.

Genom laboratorieundersökningar har man kunnat karakterisera känsligheten hos ett antal militära och civila elektronikobjekt vad avser nödvändiga strålningsnivåer för olika typer av verkan vid alla frekvenser inom ett givet frekvensintervall. Sådan information är värdefull för att känna till skillnader i känslighet mellan intressanta målobjekt och därigenom kunna anpassa ett HPM-vapen för verkan mot klasser av objekt.

Bland de mest intressanta smalbandiga mikrovågskällorna som idag kan anses ha potential för användning i ett HPM-vapen finner man Magnetron, MILO, Virkator och Reltron. Av dessa har magnetroner, reltroner och virkatorer visats kunna generera selekterbara frekvenser inom ett begränsat frekvensintervall, medan MILOn har genererat höga toppeffekter vid enstaka fixa frekvenser.

2.1.1 Virkator

Virkatorn (förkortning av virtuell katodoscillator) är en förhållandevis enkel mikrovågskälla som består av en vakuumpumpad kavitet med en elektronemitterande katod och en semitransparent anod (t.ex. ett metalltrådsnät) [10,11]. Elektroner som passerar igenom anoden bildar på andra sidan ett elektronmoln, den s.k. virtuella katoden), vars oscillationer skapar mikrovågorna som leds ut ur kaviteten via en vågledare och en hornantenn. Frekvensinnehållet i mikrovågspulserna beror i första hand av kavitets geometrisk dimensioner och placeringen av anod och katod, men även av spänningsnivå och spänningspulsens form, medan uteffekten främst beror av spänning, katodmaterial, anodmaterial, anodtransparens, vakuumkvalitet och av geometrin.

Virkatorer förekommer i flera olika geometrier (axiell, koaxiell och reflextriod är de vanligaste) och är ofta bland de första som studeras av forskargrupper som börjar med mikrovågsvapen. Nackdelen är att virkatorer har låg energiverkningsgrad (förhållandet mellan mikrovågsenergi utmatad från strålkällan och inmatad elektrisk energi i densamma under en puls), sällan över ca 10 %. Ibland rapporteras en högre effektverkningsgrad (förhållandet mellan momentant utstrålad effekt och elektrisk ineffekt) på flera tiotals procent, men detta gäller bara en liten del av en mikrovågspuls och är mindre intressant för praktisk tillämpning. Det har visat sig mycket svårt att uppnå en högre energiverkningsgrad, vilket bl.a. beror på förluster i anodmaterialet och läckage av elektroner från den virtuella katoden till kavitetsvägg m.m. Elektroner som kolliderar med anodmaterial eller kavitetsvägg genererar dessutom ett jonplasma som tenderar att kortsluta virkatorn efter ett tag, vilket förkortar pulslängden och begränsar pulsenergin.

En fördel med virkatorkonstruktioner, till skillnad från flertalet andra mikrovågskällor, är att man inte behöver generera ett magnetfält för att styra elektronbanorna, vilket minskar kraven på energitillförsel och gör att en virkator kan byggas ganska kompakt. Till virkators fördelar hör även att den är jämförelsevis tolerant mot variationer i inmatad spänningsnivå, dvs. den kan generera mikrovågspulser även om spänningen varierar något. Den är också ganska tolerant vad gäller vakuumkvalitet, dvs. även med ett medelmåttigt vakuum kan mikrovågor genereras.

Forskning och utveckling av virkatorkonstruktioner förekommer i flera länder och nya koncept dyker ofta upp. Variationer i geometrisk utformning, användning av nya elektrodmaterial, olika sätt att stämma av frekvensen för mikrovågor, etc. hör till varianter som publiceras tämligen regelbundet. Nyligen har forskare vid det ryska kärnvapenforskningsinstitutet i Sarov och ryska vetenskapsakademien offentliggjort simuleringsresultat för ett koncept där man med två motriktade elektronstrålar genererar ett tiotal virtuella katoder som påstås ha en effektverkningsgrad på upp till 50 % [12].

2.1.2 Magnetron

Magnetronen består av en vakuumkavitet, ofta med flera mindre sidokaviteter, och en centralt placerad katod, mellan vilka en högspänningspuls genererar ett elektriskt fält, samt ett mot det elektriska fältet vinkelrätt magnetfält, genererat av strömspoler eller av permanentmagneter. Elektroner emitteras från katoden och kommer att cirkulera och oscillera i det elektriska fältet som moduleras av de mindre kaviteterna. Detta ger en mycket stabil mikrovågsfrekvens och kan ge en hög uteffekt. Magnetroner har en bred användning i radarsystem, i mikrovågsugnar, samt industriellt för materialbearbetning, metallseparation i malmer, uppvärmning av plasmer, etc.

Magnetroner förekommer i flera olika varianter och det presenteras emellanåt nya koncept. Exempelvis har University of New Mexico i USA under flera år studerat koncept för magnetroner där man kan stämma av frekvensen genom att utifrån förändra den inre geometrin i kaviteten, användning av transparenta katoder, eller varianter där man vänt ut och in på magnetronen genom att placera katoden ytterst. Man har även visat att det går att använda permanentmagneter även för HPM-magnetroner [13]. Speciellt inverterade magnetroner har på senare år blivit ett intressant forskningsobjekt för HPM-tillämpning vid flera forskningsinstitut. Dessutom förekommer en kommersiell produktutveckling av magnetroner för civila tillämpningar.

Magnetroner kan generera en stabil mikrovågspuls med hög uteffekt och kan alstra många pulser med hög pulsrepetitionsfrekvens utan att vakuumkvaliteten försämras eller att elektrodmaterialen eroderas. Energiverkningsgraden är ofta hög, flera tiotals procent; resultat upp till 50-80 % har rapporterats, men det är då osäkert om man räknat med energi som krävs för att alstra magnetfältet. Frekvensen kan stämmas av inom ett begränsat frekvensintervall genom att förändra kavitetsgeometrin eller genom att ändra magnetfältets styrka. Det senare är lättare om magnetfältet genereras med spolar i stället för med permanentmagneter. Elektronerna kan emitteras från katoden antingen genom att denna värms upp (varm katod) eller med en geometri som ger en hög elektrisk fältstyrka vid katodytan (kall katod).

Magnetronen är en väl beprövad mikrovågskälla med förbättringspotential avseende uteffekt, frekvensavstämbarhet och verkningsgrad. En möjlighet skulle kunna vara att använda en magnetron med låg uteffekt för radartillämpning och sedan kunna öka toppeffekten på bekostnad av medeleffekt i syfte att använda samma magnetron som HPM-källa. Detta koncept har undersökts med viss framgång vid Air Force Research Laboratory (AFRL) i Albuquerque, USA.

2.1.3 MILO

En MILO (eng. Magnetically Insulated Line Oscillator) kan beskrivas som en linjär magnetron där magnetfältet genereras av den ström som alstrar elektronflödet i kaviteten. Därigenom undviker man särskilda anordningar för att generera och kontrollera magnetfältet [14].

MILOn kan generera höga uteffekter med stabil frekvens, men är svår att stämma av i frekvens. MILO-konstruktioner utvecklades i USA och Storbritannien för tjugotalet år sedan, men har på senare år rönt stort intresse från forskningsinstitut i Kina och Indien, bland annat genom studier av nya elektrodmaterial och geometrier, frekvensstabilitet samt försök att öka pulslängden. På grund av att MILOn genererar magnetfältet direkt från den elektronstråle som också genererar strålningen finns klara begränsningar i verkningsgrad och mycket få konstruktioner med verkningsgrad kring 10 % har redovisats. En attraktiv egenskap hos MILOn är att den har relativt låg impedans och därför kan drivas med relativt låga spänningar (~500 kV) vilket avsevärt underlättar konstruktion av HPM-systemet.

2.1.4 Reltron

En reltron (eller relativistisk klystron) är en linjär elektronstråleosillator bestående av en elektronkanon, en vakuumpumpad drifftub med sidokaviteter som modulerar elektronstrålen, samt en kollektorplatta som absorberar elektronerna efter att de passerat igenom drifftuben. Antalet kaviteter i drifftuben styr effektförstärkningen och storleken på kaviteterna styr frekvensen. Frekvensavstämbara Reltroner med uteffekt på några hundratals megawatt används rutinmässigt vid den Tyska provanläggningen SUP.R.A. Med åtta Reltroner täcker man frekvensbandet från 675 MHz till 3 GHz, t.ex. täcks frekvensområdet 1,4 GHz – 1,8 GHz av en enda strålkälla [15].

Den enda stora nackdelen med Reltronen är att den har hög impedans och därför behöver drivas med mycket höga spänningar, vanligtvis runt 1 MV. Detta gör att även om strålkällan i sig har många attraktiva egenskaper är det mycket svårt att bygga kompakta system. Vid ett stationärt testlaboratorium, som SUP.R.A, är detta inget problem men för ett HPM-vapen som skall kompakteras för att få plats på en, ofta redan välfylld, plattform blir den höga drivspänningen en stor utmaning.

2.2 Antenn

Även om mycket forskning ägnats åt att finna bra antennlösningar för HPM-system baseras de flesta antenner som faktiskt kommit till användning på traditionella lösningar. Olika typer av horn-, parabol- och gruppantennar är vanligt förekommande. Den enda verkliga skillnaden mellan en ordinär mikrovågsantenn och en antenn avsedd för HPM-system är att den senare behöver konstrueras så att den klarar de höga elektriska fält som genereras. Detta kan ställa krav på hur antennen kopplas till själva mikrovågsgeneratoren för att undvika elektriska överslag och, för de allra högsta ut effekterna, hur antennen konstrueras för att undvika överslag i själva luften vid antennen.

En intressant utveckling, som ännu inte kommit till användning i HPM-system, är de relativt nya typerna av gruppantennar som går under benämningen Active Electronically Scanned Array (AESA), där varje antennelement i en gruppantenn är kopplat till en separat förstärkare [16]. Denna teknik ger möjlighet att styra strålningens riktning och utbredningsmönster (lobform) mycket snabbt. Nackdelen i HPM-sammanhang är att varje antennelement behöver drivas av en separat förstärkare och att antennen, åtminstone för lägre frekvenser, blir mycket stor, se Figur 1. Dessa system drivs ofta av halvledarförstärkare och även om dessa aldrig kommer att komma i närheten av de effekttätheter som ett elektronrör kan ge så drivs utvecklingen mot högre effekttäthet av flera stora industrier, till exempel radar- och kommunikationsindustrin. Det är tänkbart att AESA system kan komma att användas för HPM-ändamål under de närmaste tjugo åren och kunna erbjuda helt nya möjligheter.

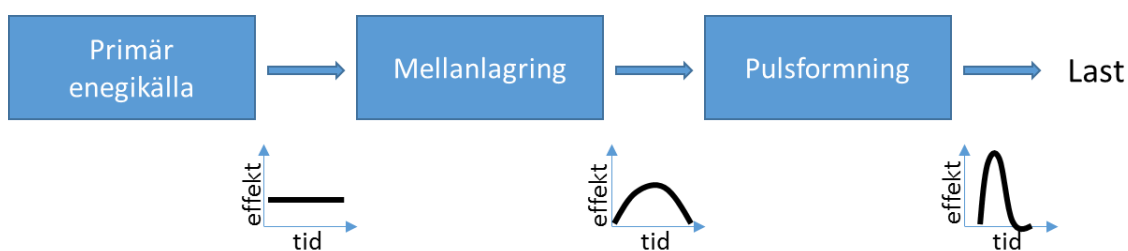
Att med AESA-teknik kunna rikta om strålningsloben på mycket kort tid (millisekunder) skulle ge möjlighet att bekämpa många rörliga mål utspridda över en stor volym, till exempel en svärm av drönare, innan dessa hinner utföra sina uppdrag. Det faktum att de drivs av förstärkare och inte oscillatorer gör vidare att det finns en viss bandbredd att tillgå och detta erbjuder möjlighet att variera utstrålad frekvens mellan pulser, vilket ökar möjligheten att slå mot flera olika typer av mål.



Figur 1. En luftvärnsradar med AESA-teknik från Lockheed Martin. Radarsystemet har en arbetsfrekvens i L-bandet (1-2 GHz) och kan både styra strålen utan att antennen behöver vridas och ändra lobformen mycket hastigt. Bild: Wikimedia commons

2.3 Pulsaggregat

Strålkällor för HPM drivs generellt av korta högspänningspulser med amplitud mellan 100 kilovolt och någon megavolt med pulslängder från några nanosekunder till några mikrosekunder. Högspänningspulsen genereras av någon typ av pulsaggregat. Pulsaggregat kan utformas på många olika sätt, men funktionsprincipen är oftast densamma. En högspänningspuls genereras genom att energin från någon typ av primär energikälla med låg spänning transformeras i ett eller flera steg till en högspänningspuls med hög toppeffekt. Figur 2 visar schematiskt hur ett pulsaggregat arbetar.



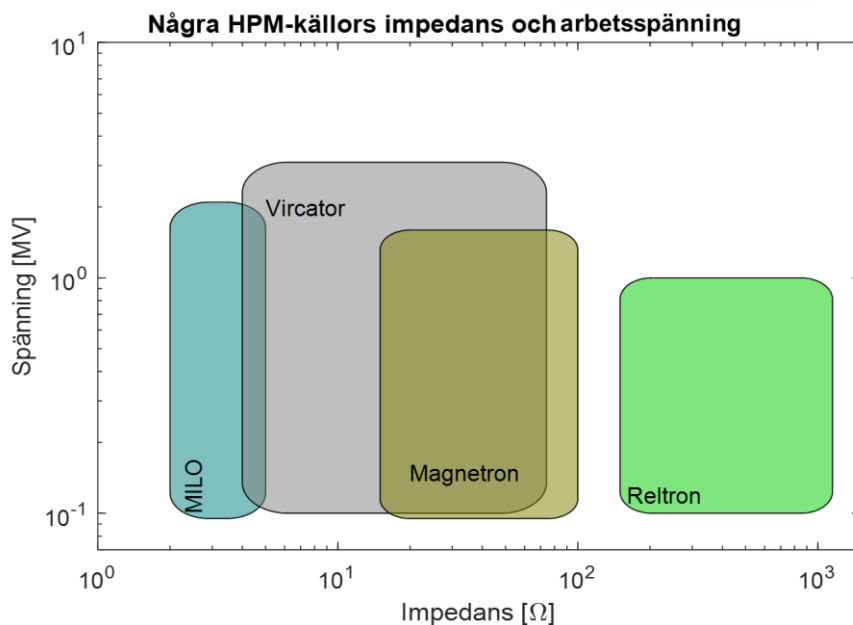
Figur 2. Generaliserad schematisk bild av ett pulsaggregats funktion.

Exempel på primära energikällor kan vara olika typer av batterier, elnätet, plattformens elektriska energisystem eller liknande, där man inte nödvändigtvis kan erhålla höga momentana toppeffekter. Vissa typer av strålkällor behöver ytterligare energiförsörjning för kringutrustning utöver högspänningspulsen, vilket påverkar kraven på den primära energikällan. Magnetroner behöver ett yttre magnetfält som kan genereras med elektromagneter, strålkällor kan behöva någon form av kylning och pumputrustning för att generera vakuum. Allt detta är exempel på kringutrustning som behöver energiförsörjas från någon primär energikälla.

Man kan uppnå kraftigare verkan i ett elektronikobjekt med en HPM-källa om man genererar en skur av tätt på varandra följande pulser med en viss pulsrepetitionsfrekvens, PRF, jämfört med om endast en puls skickas. Relevanta pulsrepetitionsfrekvenser är från tiotalet pulser per sekund till flera tusen pulser per sekund.

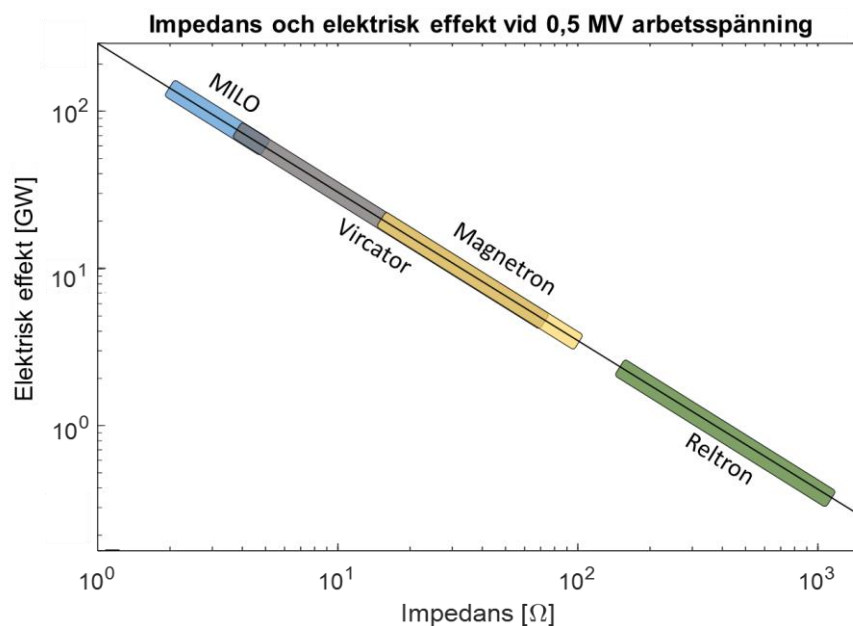
Pulsrepetitionsfrekvensen och hur länge pulsningsen pågår ställer krav såväl på den primära energikällan som på övriga delar av pulsaggregatet. Genereras repetitiva pulser i längre pulståg som varar under flera sekunder krävs relativt hög medeleffekt från den primära energikällan jämfört med kortare pulståg där ett fåtal pulser genereras med ett längre avbrott mellan pulstågen. Då kan energin till de korta pulstågen hållas tillgänglig i en mellanlagringsenhet och kravet på medeleffekt i den primära energikällan blir lägre. Med en hög pulsrepetitionsfrekvens och lång varaktighet kan pulsaggregatet behöva kylning, som också behöver energiförsörjas från den primära energikällan. Det finns flera andra tekniska begränsningar utöver energitillgång när det gäller repetitiv drift av ett pulsaggregat. Exempelvis brukar olika slutande och öppnande switchar, som används i pulsaggregat, skilja sig i hur snabbt och hur ofta de kan switcha och hur mycket energi de kan hantera.

Olika typer av strålkällor ställer olika krav på pulsaggregatet. Strålkällans impedans och krav på arbetsspänning varierar väldigt mycket beroende på konstruktion. Figur 3 visar schematiskt typisk impedans och arbetsspänning för några vanliga smalbandiga typer av HPM-strålkällor; efter [17].



Figur 3. Typisk impedans och arbetsspänning för HPM-strålkällor; ritat efter figur i [17].

Om hög elektrisk uteffekt eftersträvas blir impedansen begränsande eftersom effekten ges av spänningen i kvadrat delat med impedansen, vilket leder till att det kommer att krävas mycket höga spänningar för en källa med hög impedans. Höga spänningar behöver större isolationsavstånd för att undvika elektriskt överslag, vilket gör att systemen blir större. Flera internationella HPM-expert är av åsikten att för praktiskt realiserbara HPM-vapen på militära plattformar är 0,5 MV en övre gräns för spänningen. Figur 4 visar elektrisk effekt från pulsaggregatet som funktion av strålkällans impedans vid en fix spänningsnivå för de fyra strålkälltyperna i Figur 3. Det framgår att strålkällor med låg impedans tar emot högst elektrisk effekt, vilket ger högst mikrovågseffekt och även de största verkansavstånden. Därmed är Reltronen trots andra goda egenskaper inte särskilt intressant som strålkälla i ett HPM-vapen. Eftersom MILO konstrueras för en fix frekvens blir dess användbarhet begränsad. Intressantaste alternativen för militär HPM-tillämpning blir då Magnetronen och Virkatoren.



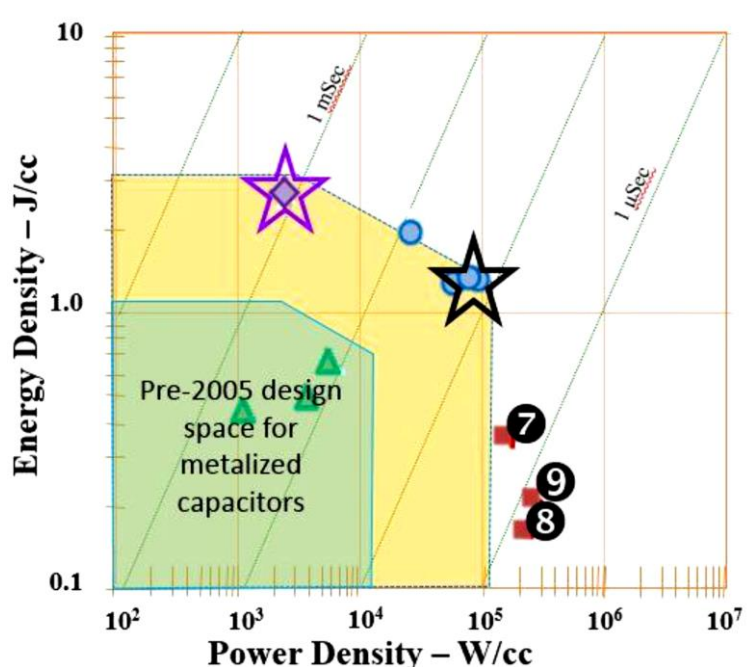
Figur 4. Typisk impedans och utmatad elektrisk effekt till olika HPM-källor; baserat på data från [17].

Utöver impedans och spänning har pulsformen som pulsaggregatet levererar betydelse. Generellt är det enklast att generera en puls med ganska långa stig- och falltider, medan många strålkällor fungerar bäst med en stabil fyrkantpuls, dvs. en konstant spänningsnivå. Pulsformning kräver utrymme, vilket gör att ett pulsaggregat som kan leverera en bra fyrkantpuls blir större än ett aggregat som bygger på en ren kondensatorurladdning utan följande pulsformning.

De vanligaste konstruktionsprinciperna för pulsaggregat är Marxgeneratorer, transmissionsledningsbaserade pulsaggregat och varianter av Teslaspolar. Marxgeneratorer bygger på kondensatorer som laddas upp parallellt och laddas ur i serie för att på så sätt erhålla en spänningsmultiplikation [18,19]. Transmissionsledningsbaserade pulsaggregat bygger på att man låter en högspänning pulsformas genom att ladda upp och ladda ur en koaxialkabel av lämplig längd [20, 21]. I en Teslaspole genereras pulsen av en avstämd resonant transformator. Konstruktionerna har olika fördelar och nackdelar. Generaliserat kan man säga att Marxgeneratorer är bättre för att åstadkomma längre pulser och kan ge stor spänningsmultiplikation medan transmissionslinjer kan ge stabila pulser med väldigt korta stig- och falltider, men ledningens längd är direkt kopplad till önskad pulslängd och den behöver matas med hög spänning. Teslaspolar kan ge väldigt korta pulser med en hög pulsrepetitionsfrekvens, men med låg effekt. I samtliga dessa konstruktioner är snabba switchar av stor betydelse [22].

Utöver switchar är kondensatorer en nyckelkomponent för de flesta pulsaggregat. Hur mycket energi som ryms i kondensatorerna och hur snabbt denna energi kan levereras (dvs. effekttätheten) påverkar direkt hur kompakt man kan bygga ett system. Kännedom om kondensatorutveckling med ökande energitäthet är avgörande för att kunna bedöma hur kompakta system det är möjligt att bygga. Kondensatorer som används i Marxgeneratorer kan konstruktionsmässigt skilja sig från kondensatorer för matning av transmissionslinjer. Figur 5 visar hur energi- och effekttätheten hos pulskraftkondensatorer har ökat under en tioårsperiod [23].

Till skillnad från situationen med strålkällor kan man köpa högspänningspulsaggregat konstruerade efter givna specifikationer, speciellt Marxgeneratorer. Bland tillverkare som har levererat sådan utrustning för att driva HPM-källor finns de amerikanska företagen APELC och REB III, medan svenska Scandinova har möjlighet att leverera olika pulsmodulatorer för högspänning.



Figur 5. Utveckling av energi- och effekttäthet i kondensatorer från 2005 (grönt område) till 2015 (gult område) [23]. Införda symboler ger exempel på några stora kondensatorer konstruerade med avancerad state-of-the-art-teknologi.

3. Tidigare FOI-verksamhet rörande HPM-vapen

FOI bedrev under åren 1993-2011 viss forskningsverksamhet inom området HPM-vapen, där man från början studerade explosivämnesdrivna strömgeneratorer. Dessa var tänkta att, tillsammans med en enkel strålkälla och möjligen en enkel antenn, användas i mycket kompakta anordningar, t.ex. granater, för att verka med enstaka pulser av mikrovågsstrålning mycket nära ett målobjekt. År 2001 omdiriktades verksamheten mot repetitiv HPM-generering där man använde elektrisk energi från en högspänningsgenerator som drivkälla, vilket gav möjlighet till långa pulsserier med tioalet pulser per sekund.

Fokus för HPM-vapenstudierna var under denna period utveckling av en smalbandig strålkälla av typen virkator. Denna valdes pga. dess relativt enkla utformning och att inget magnetfält behövs för strålningsgenereringen, samt att virkatorn fungerar även om spänningsnivån skulle variera något. Genomförda experimentella studier, stöttade av simuleringsmodeller, behandlade bl.a.:

- tester med olika elektrodmaterial för att förlänga strålkällans livslängd
- stabilitet av pulsform och uteffekt i pulsserier vid repetitiv pulsning
- strålkällans inre geometri för att generera olika strålningsmoder, polarisation, frekvenser, etc.
- frekvensavstämbarhet för att kunna verka mot olika typer av målobjekt
- strålkällans verkningsgrad, dvs. strålningsenergens andel av tillförd elektrisk energi

Detta gav erfarenhet av arbete med en smalbandig mikrovågskälla baserad på vakuumteknik samt av mätteknik för HPM-studier. Resultaten redovisades i en serie rapporter [24-29]. En slutsats från dessa studier var att frekvensavstämbarhet är väsentlig för att en HPM-källa ska kunna användas mot mål av olika karaktär och att detta kan åstadkommas genom att förändra spänningsnivå och strålkällans inre geometri. Verksamheten avslutades dock innan detta hann omsättas i en färdig konstruktion.

För de tidigare studierna av virkatorer användes specialbyggda Marxgeneratorer konstruerade vid Texas Tech University [18,19]. Dessutom testades under en period ett transmissionsledningsbaserat pulsaggregat framtaget i samarbete med Uppsala Universitet [30]. Även om pulsaggregat inte var huvudinriktningen i forskningen gav arbetet med dessa nyttiga erfarenheter som delvis har sammanfattats i olika rapporter [bl.a.31].

Under perioden 2003-2006 bedrevs, i ett separat projekt, en studie av elektriska energisystem för helelektrifierade plattformar [8]. Syftet var att undersöka hur pulssade tillämpningar, som HPM-vapen, laservapen, elektriska kanoner och elektriskt pansar, skulle kunna integreras och energiförsörjas på en mobil plattform med ett elektriskt energiförsörjningssystem. För detta konstruerades en simuleringsmodell av ett elektriskt energisystem för ett markfordon med elektrisk framdrivning [32]. Det visade sig att för ett HPM-vapen behövs en elektrisk energimängd som är försumbar jämfört med den som används för framdrivningen och inte behöver belasta energisystemet i någon större utsträckning, men att elektrisk energi som tas från fordonets energisystem behöver mellanlagras och pulsformas för att kunna driva ett repetitivt HPM-vapen som ska vara operativt under en längre tid.

4. Omvärldsutveckling inom HPM-vapen

Ryssland har visat sig använda olika avancerade former av telekrig i dagens konfliktområden. Samtidigt pågår i Ryssland forskning och utveckling av HPM-vapen för olika plattformar, främst som luftvärn mot svärmar av UAV:er, robotar, etc. Därför kan Ryssland väntas använda mikrovågsvapen i framtida konfrontationer, mot såväl militära som civila mål. Ryssland påstås ha monterat ett HPM-vapen på Buk-systemets bandgående chassi för luftvärnsapplikation [33]. Andra plattformar som nämnts kunna bära HPM-vapen är telekrigsfordonen Krashuka-2 och Krashuka-4.

USA är idag ledande inom HPM-området, med flera olika koncept. Nuvarande fokus verkar vara att använda mikrovågsvapen för att skjuta ner drönare och som flygplatsskydd [34,35]. Man har testat mikrovågsstrålning som en verkansform mot IED:er och det finns prototyper för verkan mot människor vid s.k. "crowd control". Det finns även idéer om polisiär användning av HPM för att stoppa bilar. Inom ett par decennier torde HPM-vapen finnas på flera plattformar på land, till sjöss och i luften. I USA utvecklar Boeing en demonstrator i form av en HPM-kryssningsrobot som ska kunna ta sig fram till och

bestråla målet på relativt nära håll. I det öppet tillgängliga materialet verkar det som om tanken är att den ska verka mot civil elektronik [36]. U.S. Army avser att 2024 introducera HPM-kapacitet för att kunna förstöra svärmar av drönare. En demonstration är planerad till 2022 [37].

Kina har idag en omfattande forskning inom HPM-området med ett flertal parallella verksamheter vid universitet och militärakademier. Man har upprepat västerländsk forskning inom området och gått vidare med utveckling av nya avancerade koncept. Det finns planer på mobila HPM-system för att attackera flygplan och missiler, men även system för anti-personell användning [38].

HPM kan även användas mot elektroniska triggersystem i sprängladdningar, exempelvis IED:er, i såväl militär som civil kontext. Det tyska företaget Diehl har utvecklat bredbandiga HPM-källor för denna tillämpning [39]. I USA har man tagit fram HPM-liknande strålkällor i syfte att störa/förstöra IED-elektronik. Ett problem i detta sammanhang är att kunna avgöra om en IED verkligen oskadliggjorts vid bestrålning.

Förutom nämnda länder finns det pågående forskning eller utveckling av HPM-koncept i länder som Storbritannien, Frankrike, Kanada, Indien, m.fl. Flera andra nationer studerar eller utvecklar delteknologier för HPM. Exempelvis har Polen och Tjeckien studieverksamheter inom HPM-området, men såvitt känt ännu ingen experimentell forsknings- och utvecklingsverksamhet.

Arbetsgruppen NATO SCI-294, där FOI medverkar, höll i oktober 2019 på Kreta en demonstration av HPM som verkansmedel mot drönare, personbilar och mindre båtar. Demon använde sig av kommersiellt tillgängliga system från Teledyne-e2v (England) och ITHPP (Frankrike). Systemen från Teledyne-e2v bygger på kommersiellt tillgängliga radarmagnetroner med en pulseffekt om cirka 2,5 MW och det Franska systemet, framtaget för att stoppa bilar på relativt korta avstånd (< 10 m), bygger på kommersiellt tillgänglig förstärkarteknik med en pulseffekt om cirka 40 kW. Demon visade att HPM kan stoppa de valda målobjekten, men också att det kan finnas svårigheter med inriktning av källan och att effektiviteten kan variera mellan olika typer av målobjekt när man använder en HPM-källa med fix frekvens. T.ex. varierade verkansavståndet från över 300 m till under 100 m för olika typer av drönare.

5. Möjliga internationella samarbeten inom HPM-vapen

Tyskland

FOI har sedan några år ett pågående samarbete med forskningsinstitutet Fraunhofer INT i Tyskland [40]. Detta behandlar utveckling av standardiserade procedurer och jämförelse av olika mättekniker för att karakterisera elektronikobjekts känslighet för HPM-påverkan med strålning av olika karaktär. Dessutom har FOI tidigare haft kontakter med det tyska företaget Diehl och även fått långtidslåna några av deras bredbandiga strålkällor för tester och demonstrationer i Sverige [41]. Det tyska företaget Rheinmetall har tidigare studerat smalbandiga HPM-källor och bedriver troligen fortfarande viss HPM-verksamhet av intresse. Baserat på hittillsvarande mycket goda erfarenheter av samverkan med tyska aktörer inom HPM-området bedöms möjligheterna till samarbeten eller erfarenhetsutbyte med Tyskland rörande utveckling av HPM-källor som synnerligen goda.

Frankrike

Även Frankrike har HPM-verksamhet av intresse för framtida kontakter avseende HPM-vapen. Under det tidigare HPM-vapenprojektet utbyttes erfarenheter inom HPM med bl.a. Direction générale de l'armement (DGA). Ecole Polytechnique utvecklade i mitten av 00-talet en smalbandig HPM-källa av MILO-typ med intressanta resultat. Inom HPM-området har FOI främst haft kontakt med Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL). Tillsammans med ISL bedrev FOI utveckling av mätteknik för HPM under åren 2005-2010, vilket bl.a. resulterade i några gemensamma publikationer [42,43]. Erfarenheterna av samverkan med Frankrike är goda och bör kunna fortsätta i någon form.

Storbritannien

Kontakter har tidigare förekommit inom HPM-vapenområdet med bl.a. Defence Science and Technology Laboratory (DSTL), MBDA Missile Systems, QinetiQ och Loughborough University i Storbritannien, till exempel under det svenska HPM-demonstrationsprojektet som bedrevs 2001-2009. En FOI-virkator utlånades 2005 till Loughborough University för några gemensamma experiment med en vid universitetet

konstruerad högspänningskälla [44]. Storbritannien har onekligen en hel del intressanta HPM-verksamheter, men för närvarande är möjligheterna till samverkan osäkra, bl.a. på grund av den pågående Brexit-processen.

Nederländerna

FOI har under 00-talet deltagit i HPM-workshops med Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (TNO) Nederländerna och DSTL i Storbritannien. Särskilt Nederländerna visade sig ha ambitioner och intressen liknande Sveriges inom HPM-området. Dock har TNO en något mera kommersiell inriktning av sin verksamhet än FOI.

Norge

Genom NORDAC/NORDEFECO-samarbetet (Danmark, Finland, Norge, Sverige) har FOI flera gånger varit värd för eller deltagit i gemensamma försökskampanjer med HPM-bestrålning av utvalda elektronikobjekt [42,45]. Förutom i Sverige verkar ingen aktiv utveckling av HPM-vapenområdet bedrivas i de nordiska länderna, även om Norge har visat intresse för HPM-generering i olika typer av strålkällor [46].

Kanada

Runt millennieskiftet hade FOI ett samarbete med Defence Research Establishment Valcartier (DREV) och Defence Research Establishment Ottawa (DREO) för studier av kompakta explosivämnesdrivna HPM-generatorer och enkla strålkällor [47]. FOI har även deltagit i trinationella workshops med Kanada, Nederländerna och Sverige, t.ex. inom CIED-området [48].

USA

FOI har kontakter med amerikanska institut som bedriver utveckling av HPM-vapen, t.ex. med Air Force Research Laboratory (AFRL) och University of New Mexico (UNM). Tidigare har FOI samverkat med Texas Tech University (TTU) för utveckling av repetitiva högspänningspulsaggregat och virkatorer på uppdrag av FMV. AFRL har uttryckt intresse för att samarbeta med FOI inom HPM-området och i februari 2019 besökte FOI och FMV AFRL för att diskutera intressanta samarbetsområden [49] och några månader senare besökte en delegation från AFRL FOI:s anläggning vid Grindsjön. Inga beslut om framtida projektsamarbeten har ännu tagits.

NATO

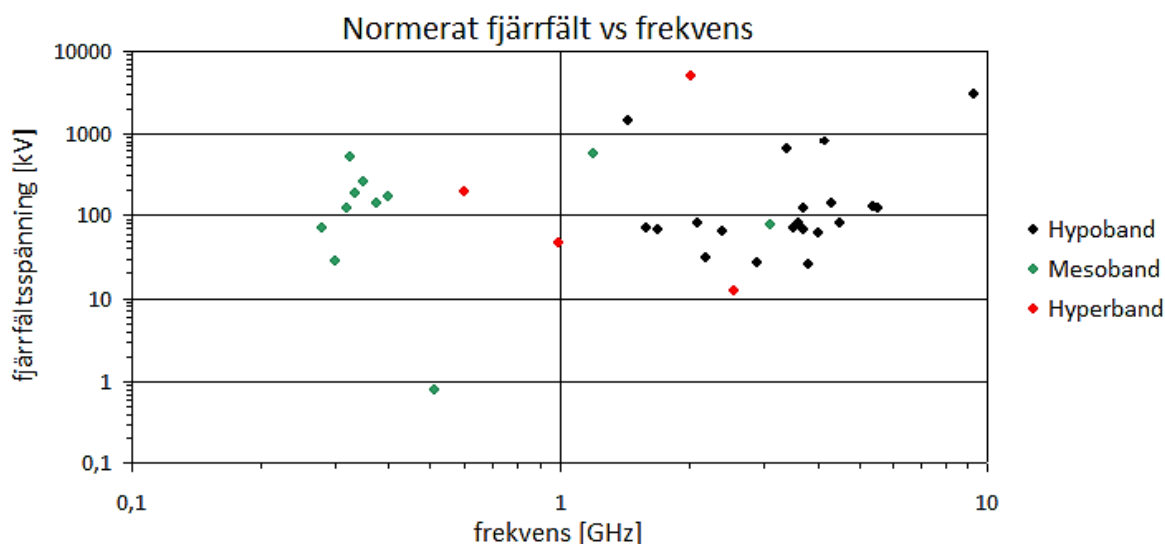
Genom nu pågående verksamhet i arbetsgruppen SCI-294 "Demonstration and Research of Effects of RF Directed Energy Weapons on Electronically Controlled Vehicles, Vessels and UAVs" har FOI tillgång till information om utvecklade HPM-genererande system och resultat från tester, som t.ex. det av det brittiska företaget e2v framtagna systemet för bekämpning av UAV:er (se nedan). Medlemskap i gruppen ger också ett mycket bra kontaktnät och insikt i andra nationers forskningssatsningar inom HPM-området. SCI-294 avslutas under 2020 men med största säkerhet kommer gruppen att fortsätta samarbeta kring HPM-frågor men med ett något annorlunda fokus. Länder som är representerade inom SCI-294 är: USA, Storbritannien, Frankrike, Tyskland, Nederländerna, Danmark, Norge, Litauen och Sverige.

6. Möjliga verkansavstånd för olika typer av vapensystem och mål

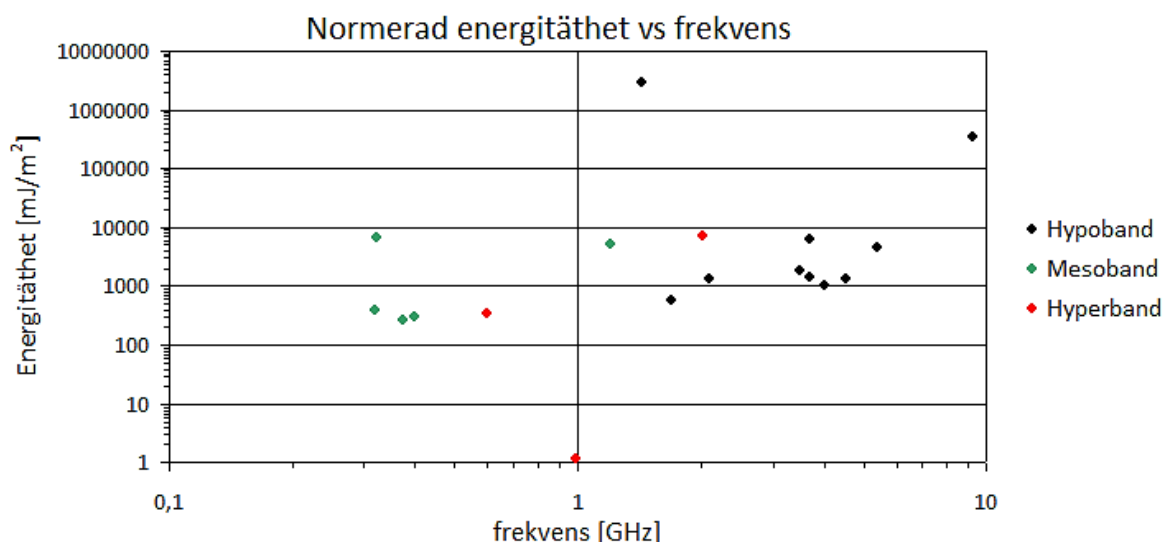
Verkansavståndet för ett HPM-vapen mot ett elektroniskt system ges, enkelt uttryckt, av systemets sårbarhet vid den genererade frekvensen samt vapnets uteffekt och antennförstärkning. Sårbarheten kan i en första approximation anges som den lägsta elektriska fältstyrka (eller effekttäthet) som med någon grad av säkerhet ger önskad verkan (störande eller förstörande). Det är möjligt att konstruera och bygga HPM-system som ger flera Gigawatt uteffekt i kombination med en antenn som har hög antennförstärkning (t.ex. en parabolantenn) men systemets vikt och volym ökar med önskad uteffekt och energi per puls.

En sammanställning av elektrisk fältstyrka på ett referensavstånd och dominerande frekvens för olika HPM-system återfinns i Figur 6. Sammanställningen visar att det finns bredbandiga hyperband- och mesoband-system som ger ungefär samma elektriska fältstyrka som stora stationärt installerade smalbandiga hypoband-system. Det bör dock påpekas att pulsenergin kan skilja sig flera storleksordningar då pulslängden för mesoband-system ligger på några få nanosekunder medan pulslängden för hypoband-

systemen kan vara upp till några mikrosekunder långa vilket ger en högre energitäthet per puls, vilket illustreras i Figur 7. Dessutom är det så att bara en bråkdel av den i Figur 7 angivna pulsenergin för hyperband- och mesobandsystemen avges vid den dominerande frekvensen som indikeras av respektive punkt i figuren; i själva verket sprids energin ut över ett större frekvensband, vilket ökar sannolikheten att någon frekvens kan tränga in i målobjektet men minskar sannolikheten för verkan i objektet.



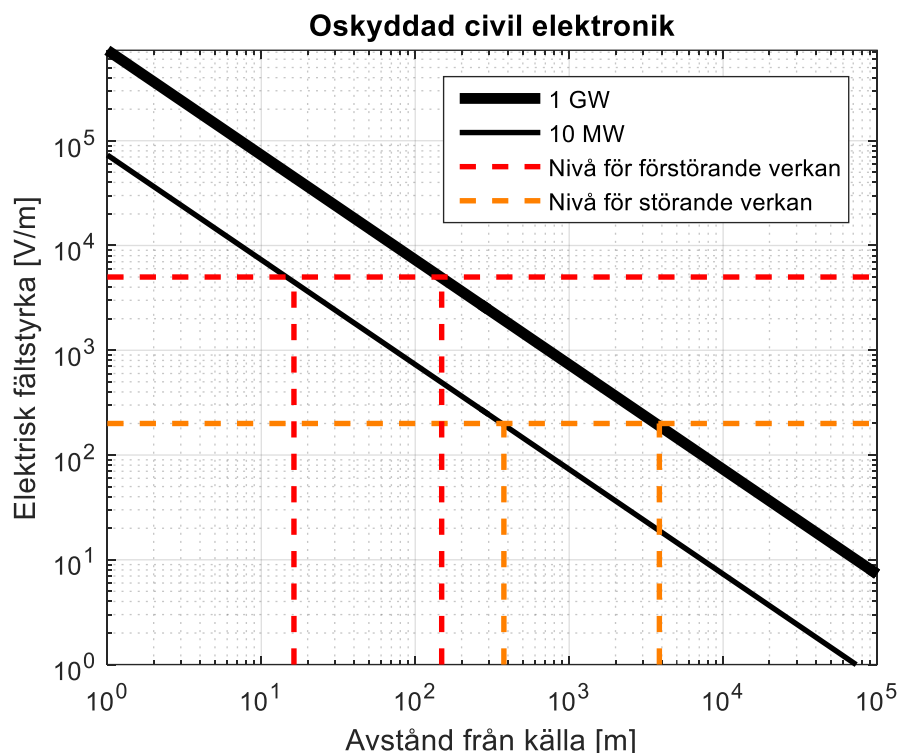
Figur 6. Sammanställning av maximal elektrisk fältstyrka normerat till ett referensavstånd som funktion av dominerande frekvens för ett urval HPM-källor av olika typ. Notera att mesoband- och hyperbandkällor även innehåller frekvenser inom ett brett frekvensband kring den dominerande frekvensen. Figuren är framtagen med den vid FOI utvecklade "Hotkatalog HPM", se [40].



Figur 7. Sammanställning av energitäthet i en enstaka mikrovågspuls normerat till ett referensavstånd som funktion av dominerande frekvens för ett urval HPM-källor av olika typ. Notera att eftersom mesoband- och hyperbandkällor även innehåller frekvenser inom ett brett frekvensband kring den dominerande frekvensen kommer den energi som faktiskt levereras vid den dominerande frekvensen att vara betydligt mindre än vad värdena i figuren ger sken av. Figuren är framtagen med den vid FOI utvecklade "Hotkatalog HPM", se [40].

Under antagandet att vi känner målsystemets känslighet för störande och förstörande verkan kan verkansavståndet för HPM-vapen med olika prestanda enkelt illustreras grafiskt. Antag två olika HPM-vapensystem, det ena med en uteffekt om 1 GW och det andra med en uteffekt om 10 MW, båda med antenner som ger 25 dB antennförstärkning. Vidare är målet sådant att det störs ut genom

bakvägskoppling vid ett elektriskt fält om 200 V/m och att det förstörs permanent om elektriska fältet når en nivå om 5 kV/m. Båda dessa nivåer (200 V/m och 5 kV/m) är realistiska för många civila oskärnade elektroniska system. Figur 8 visar hur störande verkan kan åstadkommas på upp till runt 4 km med det kraftfullare systemet och upp till 400 m med det mindre systemet.



Figur 8. Grafisk representation av verkansavstånd för två olika HPM-system och två olika verkansformer (störande och förstörande verkan). Störande verkan kan åstadkommas på upp till runt 4 km med det kraftfullare systemet och upp till 400 m med det mindre systemet. Verkansavstånd för förstörande verkan är dock mycket mindre, strax över 100 m respektive strax över 10 m.

Oskyddade radiokommunicerande system kan störas och förstöras vid mycket lägre nivåer då energin kopplar rakt in via antennen och går in i den förstärkare som finns på antenningången, vanligtvis en så kallad lågbrusig förstärkare (eng. Low Noise Amplifier, LNA). FOI har tidigare studerat tåligheten hos sådana förstärkare genom att direktinjicera korta mikrovågspulser på ingången [50,51].

Som tidigare nämnts är repetitionsfrekvensen och pulslängden av stor betydelse för störande verkan; diagrammet i Figur 8 tar ingen hänsyn till detta. Strålkällor som genererar 1 GW uteffekt är inte kommersiellt tillgängliga, däremot finns radarmagnetroner och andra typer av elektronrör med uteffekter på upp till 10 MW tillgängliga på marknaden. Dessa bygger på väl etablerad teknik från radarområdet och är designade för att kunna generera åtskilliga miljoner pulser under en livstid, ofta med relativt hög repetitionsfrekvens (~ 1 kHz) och relativt långa pulser (> 1 μ s).

Ett exempel på hur kommersiellt tillgänglig teknik används i system för att t.ex. bekämpa små UAV:er är ett system från brittiska e2v som går under benämningen LCMOD_L3_500F och bygger på en L-bands magnetron med en uteffekt omkring 2,5 MW. Magnetron och drivelektronik (pulsgenerator) väger cirka 500 kg och är monterat på ett fjärrstyrt tilt-shift stativ, se Figur 9. Magnetronen genererar en fabriksinställd frekvens mellan 1,305 och 1,3685 GHz och fältstyrkan på 40 m uppges till 2700 V/m, vilket ger ett normaliserat E-fält på $2700 \times 40 = 108$ kV. Enheten saluförs som ett anti-UAV system men kan säkerligen även användas mot andra typer av elektronik.



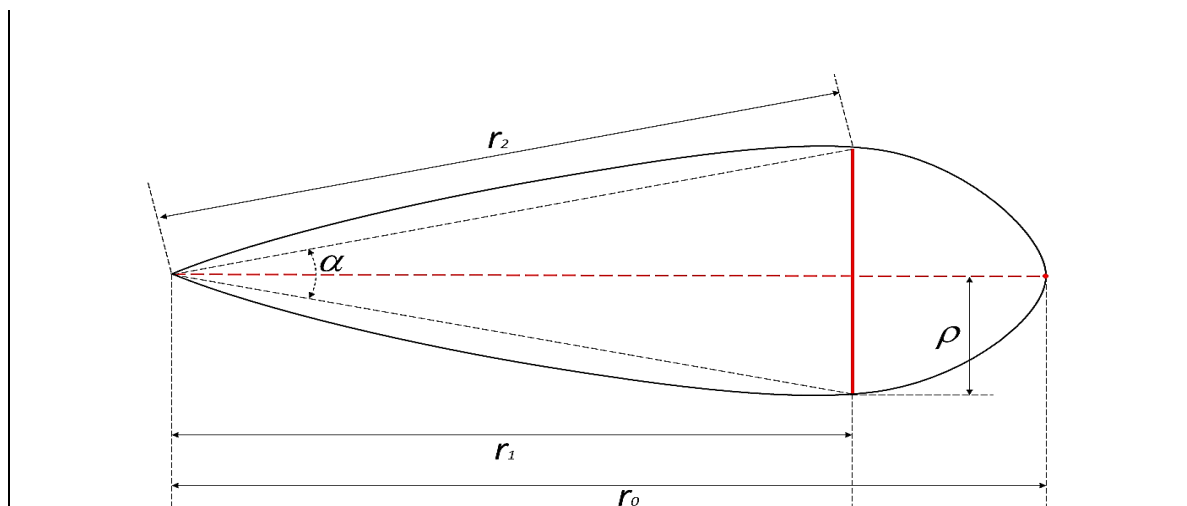
Figur 9. LCMOF L3 500F från brittiska e2v är ett system framtaget för bekämpning av UAV:er. Verkansavstånd uppges variera från 200 m upp till 500 m beroende på UAV-modell. Antennen är av typen 'slotted waveguide' med runt 20 dBi antennförstärkning, pulslängden kan varieras mellan 1 och 4 μ s och maximal pulsfrekvens är 1000 Hz. Medföljande mjukvara ger operatören möjlighet att förprogrammera olika typer av pulståg och alltså variera pulsfrekvens och pulslängd under pulståget. Magnetron, pulsaggregat och antenn väger cirka 500 kg men monterat på stativet blir totalvikten troligen runt 1500 kg.

6.1 Strålningslobens inverkan

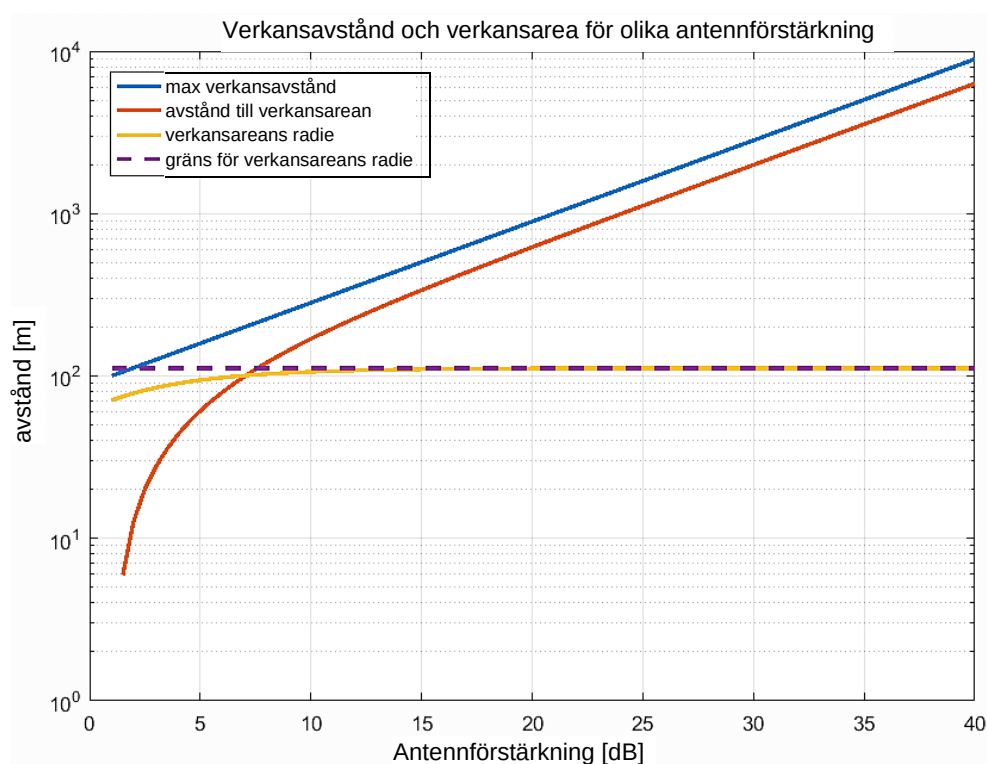
Till skillnad från laservapen, som producerar en smal laserstråle, formar mikrovågor från ett HPM-vapen en strålningslob (huvudlob) som har en viss bredd och upptar en viss vinkel sett från strålkällan. Orsaken är den stora skillnaden i frekvens/våglängd mellan ljus och mikrovågor trots att båda utgör elektromagnetisk strålning. Detta innebär att HPM-strålningens effekttäthet avtar snabbare med avståndet eftersom den sprids ut över en större area, men det kan också vara en fördel att man inte behöver rikta ett mikrovågsvapen lika exakt som ett laservapen. Dock krävs det möjligheter att kunna rikta in HPM-vapnet och kunna följa ett rörligt målobjekt för att maximera verkan. En bred lob kan också verka mot flera målobjekt samtidigt, t.ex. en svärm av samverkande UAV:er.

Figur 10 visar schematiskt en rotationssymmetrisk strålningslob i genomskärning. Baserat på av HPM-källan utmatad strålningseffekt och på den använda antennens riktverkan kan man räkna ut ett verkansavstånd och en verkansarea, som dock befinner sig på ett kortare avstånd från källan.

Figur 11 återger resultatet för ett tänkbart system där man använt ett typiskt värde på den fältstyrka för vilken en viss typ av oskyddat elektronikobjekt kan påverkas med HPM. Man ser exempelvis att en antennförstärkning på 20 dB ger ett verkansavstånd på ca 900 m och verkansareans radie blir ca 100 m på avståndet ca 600 m från strålkällan. För ett skyddat elektronikobjekt kommer dessa avstånd att krympa påtagligt. Notera att verkansareans radie är nära konstant redan från en antennförstärkning på ca 10 dB.



Figur 10. Schematisk strålningslob med beteckningar. Röd streckad linje är verkansavståndet (r_0). Röd heldragen linje markerar verkansareans position (med radien ρ) på avståndet r_1 .

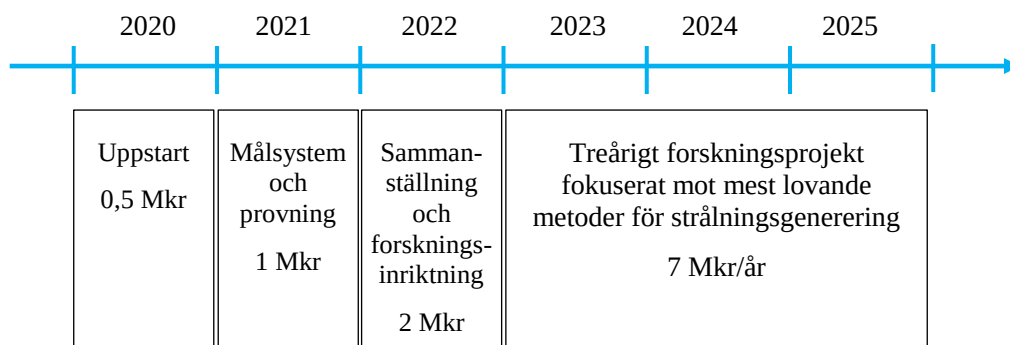


Figur 11. Variation av verkansavstånd (blå linje), avståndet till verkansarean (röd kurva) samt verkansareans radie (gul kurva) med varierande antennförstärkning. Minsta fältstyrka för verkan är här satt till 194 V/m (motsvarar en effekttäthet på 100 W/m^2 för störande verkan mot oskyddad elektronik, t.ex. i en liten UAV) och källans uteffekt är satt till 10 MW. Streckad linje anger övre gränsen för verkansareans radie.

7. Förslag till forskningsplan

7.1 Övergripande plan och forskningsfrågeställningar

Då forskningen inom HPM-vapenområdet legat nere under nästan ett decennium behöver kunskap och bemanning återtas och laboratorieresurser återuppbyggas. Perspektivet är treårigt och förslaget bygger på att resurser ökas succesivt under denna period. Speciellt studeras tekniker och system för att åstadkomma mycket kraftig mikrovågsstrålning. Hela kedjan från primär energi till mellanlagring, pulsformning och mikrovågsgenerering skall tas i beaktande. Verksamheten baseras på omvärldsanalys och teoretiska studier. HPM som verkan mot små flygande system är av särskilt intresse.



Figur 12. Förslag på treårig upptartsfas följt av ett treårigt forsknings- och utvecklingsprojekt för framtagning av kraftigare HPM-strålkälla.

För den första treårsperioden föreslås frågeställningar enligt:

- Vilka tekniker för strålningsgenerering verkar mest lovande avseende störande och/eller förstörande verkan på olika verkansavstånd?
- Vilka systemkoncept passar på vilka plattformar och vilka verkansavstånd kan därigenom åstadkommas från olika plattformar?

Under första året inleds arbetet med en noggrannare omvärldsanalys av HPM-vapenforskning i ett internationellt perspektiv i syfte att kartlägga de senaste årens utveckling. Detta görs lämpligen genom att gå igenom de senaste årens vetenskapliga publikationer, främst avseende strålkällor för HPM, men även för att skaffa en mera ingående kunskap om möjliga prestanda hos pulsaggregat för HPM.

För att knyta nya kontakter och återuppliva gamla är det dessutom lämpligt att under året besöka åtminstone en vetenskaplig konferens som avhandlar tekniker inom HPM-vapenområdet, t.ex. European Asian Pulsed Power Conference (EAPPC) som 2020 går i Frankrike. Nästa större konferens av intresse är IEEE Pulsed Power Conference i Denver, USA, 2021.

Vidare bör verksamheten fokuseras mot taktiskt användbara system varför vikt och volym behöver ställas mot verkansavstånd. Olika verkansform (störande eller förstörande) kräver olika typer av HPM-system. För att åstadkomma störande verkan är en hög pulsrepetitionsfrekvens mycket viktig medan förstörande verkan är mer beroende av energiinnehållet i varje enskild puls.

För att bedöma verkansavstånd mot olika typer av mål behöver dessa specificeras, åtminstone grovt. Provning av sårbarhet för mindre system kan utföras med befintlig utrustning och baserat på resultaten från sådan provning kan sedan verkansavstånd för vapensystem på olika plattformar uppskattas. Under projektets andra år bör därför tänkta målsystem inköpas och provas. Anskaffning av intressanta målsystem sker i samarbete med Försvarmakten och FMV som dels behöver specificera vilka mål som kan vara av intresse och eventuellt även stå för kostnaden för dyrare system.

Det huvudsakliga slutresultatet efter tre år bör vara en sammanställning av vapensystem som passar på några olika typer av plattformar och vilka verkansavstånd dessa kan erbjuda mot de mål som provats inom ramen för projektet. Baserat på sammanställningen tas även beslut om forskningsinriktning för nästa treårsperiod då experimentella faciliteter återuppbyggs, experimentell kompetens och simuleringskompetens återtas och investeringar i forskningsinfrastruktur genomförs.

Under den senare delen av uppstartsfasen kan någon form av internationellt utbyte av erfarenheter eller samarbete sökas, företrädesvis av den typen som kan ge ett betydande mervärde för återtagande av förmåga inom HPM-området.

Genomförande av denna forskningsplan ger en solid grund för fortsatt forsknings- och utvecklingsarbete för att kunna ta fram strålkällor för HPM-vapentillämpning under fältmässiga förhållanden och för verkan mot flera olika typer av målobjekt.

7.2 Bemanning och budgetering

Första året under uppstartsfasen behövs endast en mindre insats för att genomsöka litteraturen och bevista konferenser. Andra året genomförs dedicerad provning av utvalda målsystem, vilken utförs i befintligt laboratorium, provning som kräver såväl mätteknisk expertis som experimentalistkompetens. Under år två startas också uppbyggnad av en simuleringsmiljö för utveckling av strålkällekonstruktioner som stöd för kommande experimentella studier av HPM-strålkällor.

För perioden 2023-2025 behövs medel för investeringar i utrustning och infrastruktur. Detta innefattar bl.a. utrustning för att driva kraftiga strålkällor (anpassade högspänningspulsaggregat), upprustning eller nyinköp av ekofri kammare, mätutrustning för höga fältnivåer och mjukvara för simulering och design av strålkällor. Större infrastrukturobjekt behöver planeras redan under 2022 och finansieringen behöver då vara tydliggjord.

7.3 Resultatöverföring

Förutom vetenskaplig dokumentation och en årlig sammanfattande rapport av arbetet hålls mot slutet av det sista året i uppstartsfasen ett seminarium om genomförd verksamhet och planeringen av det därpå följande treåriga projektet fokuserat mot mest lovande metoder för strålningsgenerering.

Referenser

1. NATO International Staff – Defence Investment Division, *Electrical and Electromagnetic Environmental Conditions*, AECTP-250, Edition 2, Leaflet 257 HPM, January 2011.
2. International standard IEC 61000-2-13, *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-13: Environment - High-power electromagnetic (HPEM) environments - Radiated and conducted*, First edition 2005-03.
3. Lars-Gunnar Huss, Magnus Höijer, *Electronic Equipment Susceptibility Test*, FOI-RH--0765--SE, juni 2008.
4. Technical specification IEC TS 61000-5-9, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-9: Installation and mitigation guidelines – System-level susceptibility assessments for HEMP and HPEM*, Edition 1.0, 2009-07.
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Starfish_Prime.
6. Carlo Kopp, *An Introduction to the Technical and Operational Aspects of the Electromagnetic Bomb*, Australian Air Power Studies Centre, paper number 50, November 1996.
7. Information erhållen genom personliga kontakter med två olika forskarteam.
8. Sten E Nyholm, Mose Akyuz, Sten Andreasson, Anders Larsson, *Slutrapport AECV-energisystem*, FOI-R--2195--SE, december 2006.
9. Anders Larsson, Patrik Appelgren, Cecilia Nylander and Sten E Nyholm, *Narrow-band radiation sources for HPM applications*, FOI-R--0929--SE, september 2003.
10. Patrik Appelgren, Anders Larsson, *Virkatorn och dess varianter – Litteraturoversikt och analys*, 2002, FOI-R--0624--SE.
11. Cecilia Möller, *Design and Experiments with High Power Microwave Sources, The Virtual Cathode Oscillator*, Doctoral Thesis, KTH, ISSN-1653-5146, 2012.
12. Alexander Dubinov, Sergey Saikov, Vladimir Tarakanov, *Multivircator as a new highly-effective microwave generator with multiple virtual cathodes: concept and PIC-simulation*, inskickad för publicering i IEEE Transactions on Plasma Science, hösten 2019.
13. A. J. Sandoval, *Experimental Verification of A6 Magnetron with Permanent Magnet*, University of New Mexico, Albuquerque, USA, ,2018, https://digitalrepository.unm.edu/ece_etds/400.
14. Patrik Appelgren, Sten E Nyholm, Anders Larsson, *MILO-litteraturoversikt med inledande analys*, 2002, FOI-R--0623--SE.
15. A. Kaiser, L. Meyer, B. Römer, U. Schenk, *Frequency Augmentation of the WIS HPM Test Facility SUP.RA*, NATO RTO-MP-SCI-177, 2007.
16. *Active electronically scanned array*, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Active_electronically_scanned_array.
17. James Benford, John A. Swegle, Edl Schamiloglu, *High Power Microwaves*, Third edition, CRC Press, 2016, Figure 5.3, p. 153.
18. Mattias Elfsberg, Patrik Appelgren, Tord Hultman, *Beskrivning av och inledande försök med ett system bestående av laddaggregat och marxgenerator*, FOI-R--1202--SE, mars 2004.
19. Mattias Elfsberg, Patrik Appelgren, Tomas Hurtig, *Repetitive Marx Generator for HPM*, FOI-R--2009--SE, juni 2006.
20. Adam Lindblom, *High Voltage Transmission Line Transformer*, FOI-R--0541--SE, juni 2002.
21. Adam Lindblom, *Inductive Pulse Generation*, Doctoral Thesis, Uppsala University, ISSN-1651-6214, 2006.
22. E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*, second edition, Newnes, 2001, ISBN 0-7506-3634-3.
23. T.R. Jow, F.W. MacDougall, J.B. Ennis, X.H. Yang, M.A. Schneider, C.J. Scozzie, J. D. White, J.R. MacDonald, M.C. Schalnat, R.A. Cooper, S.P.S. Yen, *Pulsed Power Capacitor Development and Outlook*, IEEE Pulsed Power Conference (PPC), Austin Texas 31 May – 4 June 2015, pp. 1-7.
24. Sten E Nyholm, Patrik Appelgren, Mattias Elfsberg, Tomas Hurtig, Anders Larsson, Cecilia Nylander, *Parameterstudie av virkatorstrålkälla*, FOI-RH--0472--SE, november 2005.
25. Sten E Nyholm, Mose Akyuz, Patrik Appelgren, Gert Bjarnholt, Mattias Elfsberg, Tomas Hurtig, Anders Larsson, Cecilia Nylander, *Slutrapport Generering av HPM*, FOI-RH--0494--SE, december 2005.

26. Mattias Elfsberg, Tomas Hurtig, Cecilia Möller, Sten E Nyholm, *Studie av anod-katodmaterial för en repetitivt pulsad axiell virkator*, FOI-RH--0672--SE, september 2007.
27. Sten E Nyholm, *Systemkoncept för repetitiv HPM-generering*, FOI-RH--0704--SE, december 2007.
28. Mattias Elfsberg, Cecilia Möller, Sten E Nyholm, *Statusrapport studie axiell virkator - Elektrodmaterialstudien*, FOI-RH--0766--SE, juni 2008.
29. Sten E Nyholm, Mose Akyuz, Patrik Appelgren, Mattias Elfsberg, Tomas hurtig, Anders Larsson, Cecilia Möller, *Slutrapport för projekt Repetitiva HPM-vapen*, FOI-RH--0822--SE, december 2008.
30. Adam Lindblom, Mattias Elfsberg, Tomas Hurtig, Anders Larsson, Sten E Nyholm, *First Trials with a 45 GW Cable-Based Pulsed-Power Generator*, FOI-S--3262--SE, 2009.
31. Patrik Appelgren, *Gigawatt Pulsed Power Technologies and Applications*, Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, maj 2011, TRITA-EE 2011:034.
32. Sten E Nyholm, *Modellering av energiflödeskontroll för AECV-energisystem*, FOI-R--1914--SE, januari 2006.
33. Jonas Kjellén, *Russian Electronic Warfare*, FOI-R--4625--SE, September 2018.
34. Kevin Robinson-Avila, *The Air Force has a new drone-killing microwave weapon named 'Thor'*, Albuquerque Journal, <https://taskandpurpose.com/air-force-thor-microwave-weapon>.
35. Rachel S. Cohen, *Microwave Weapons Moving Toward Operational Use*, <http://www.airforcemag.com/Features/Pages/2019/March%202019/Microwave-Weapons-Moving-Toward-Operational-Use.aspx>.
36. *CHAMP - Lights Out*, Counter-electronics High-powered Microwave Advanced Missile Project (CHAMP), <http://www.boeing.com/features/2012/10/bds-champ-10-22-12.page>, 2012.
37. Judson, J., *Soon to come to the Army: A high-power microwave to take out drone swarms*, Defence News 2019-08-07, <https://www.defensenews.com/digital-show-dailies/smd/2019/08/07/the-armys-indirect-fires-protection-system-is-getting-a-high-power-microwave/>.
38. Richard D. Fisher, Jr, *China's Progress with Directed Energy Weapons, Testimony before the U.S.-China Economic and Security Review Commission hearing*, "China's Advanced Weapons", Washington, D.C, February 23, 2017.
39. *Living in a safe environment*, https://www.diehl.com/cms/files/Diehl_Defence_Brosch%C3%BCre2018_en.pdf.
40. Tomas Hurtig, Mattias Elfsberg, Hanna Sundberg, Sten E Nyholm, Niklas Wellander, *HPM Sårbarhetsanalys, årsrapport 2018*, FOI-RH--2024--SE, december 2018.
41. Sten E Nyholm, Mats Bäckström, Mattias Elfsberg, Magnus Höijer, *Utbildning och demonstration av HPM vid FOI, maj 2006*, FOI-RH--0641--SE, mars 2007.
42. Sten E Nyholm, Mattias Elfsberg, Lars-Gunnar Huss, Magnus Höijer, Tomas Hurtig, *Sammanfattning av utlandssamarbeten inom HPM-området*, FOI-R--3008--SE, juni 2010.
43. Bieth F., Delmote P., Elfsberg M., Möller C., Nyholm S.E., *ISL-FOI Partnership - HPM Metrology. Second Step: Improvement of HPM metrology Devices*, ISL-R 123/2009, 2009-10-27.
44. Bucur Novac, Marko Istenic, Jing Luo, Ivor Smith, John Brown, Martin Hubbard, Patrik Appelgren, Mattias Elfsberg, Tomas Hurtig, Cecilia Möller, Anders Larsson, Sten E Nyholm, *10-GW pulsed power supply for HPM sources*, FOI-S--2448--SE, januari 2006.
45. Lars-Gunnar Huss, Magnus Höijer, *HPM Tests on Typical IEDs*, FOI-RH--0989--SE, juni 2010.
46. Børve Steinar, *The physics of HPM sources*, FFI-rapport 2008/00014, 2008-01-04.
47. Sten E Nyholm, Patrik Appelgren, Anders Larsson, *Analys av strålning från RF-källa*, FOI-RH--0246--SE, november 2003.
48. *CAN-NLD-SWE Tri-lateral workshop*, dnr FOI-2009-1656:5 (H/S), 2010-06-23.
49. Tomas Hurtig, *Sammanfattning och intryck från besök vid Air Force Research Laboratory*, FOI Memo H2057, maj 2019.
50. Rolf Jonsson, Magnus Höijer, *Pulse length and power dependency of the failure threshold of a low noise amplifier*, FOI-S--2714--SE, 2007.
51. Quamar-Ul Wahab, Rolf Johnsson, Magnus Höijer, Lars-Gunnar Huss, *Failure of low noise amplifier stressed by multiple microwave pulses*, 2010, FOI-R--3146--SE.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se