



·高功率微波技术专辑·综述·

浅析美国高功率微波效应研究动态*

张帅^{1,2}, 张艺博², 涂敏²

(1. 西安交通大学微电子学院, 西安 710049; 2. 西北核技术研究所先进高功率微波技术重点实验室, 西安 710024)

摘要: 简要介绍了美国国际高级研究计划局(DARPA)发布的“波形捷变射频定向能(WARDEN)”项目、空军研究实验室公布的《定向能和基地防御》和《定向能未来2060——美国国防部定向能技术未来40年远景》报告,重点分析了“WARDEN”项目、《定向能和基地防御》和《定向能未来2060——美国国防部定向能技术未来40年远景》报告中的高功率微波效应研究动态,分析归纳了当前美国高功率微波效应研究进展和研究重点是“深化无人机和巡航导弹高功率微波后门扰乱效应机理,提升高功率微波武器系统对无人机和巡航导弹的攻击距离”,这些结论可为我国高功率微波效应研究提供重要参考。

关键词: 波形捷变射频定向能; 定向能未来2060; 定向能和基地防御; 高功率微波效应

中图分类号: TN820.1

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202436.230304

Brief analysis of research trends of high power microwave effect in the United States

Zhang Shuai^{1,2}, Zhang Yibo², Tu Min²

(1. School of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Key Laboratory of Advanced Science and Technology on High Power Microwave, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024 China)

Abstract: This paper briefly introduces the Waveform Agile Radio-frequency Directed Energy (WARDEN) project released by Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), Directed Energy and Base Defense, and Directed Energy Futures 2060—Visions for the next 40 years of U.S. Department of Defense Directed Energy technologies released by Air Force Research Laboratory, focuses on the analysis of high power microwave effect research in the above reports. The present research progress and future research emphases of high power microwave effect in the United States are presented as “further investigating the mechanism of high power microwave backdoor disrupting effect of UAVs and cruise missiles, improving the attack distance of high power microwave weapon system to UAVs and cruise missiles”, these conclusions will provide important references for our high power microwave effect research.

Key words: waveform agile radio-frequency directed energy, Directed Energy Futures 2060, directed energy and base defense, high power microwave effect

近年来,美国十分重视高功率微波武器这一新质战斗力的生成与运用,研发“相位器(PHASER)”、“战术高功率作战响应器(THOR,‘雷神’)”、“高功率微波反电子增程型空军基地防空(CHIMERA)”系统、“雷神之锤”(Mjölmir)系统、“列奥尼达斯(LEONIDAS)”固态高功率微波、“反电子高功率微波先进导弹(CHAMP)”、“高功率联合电磁非动能打击(HIJENKS)”、“墨菲斯(MORFIUS)”、“郊狼-3(Coyote Block-3)”和车载毫米波主动拒止等高功率微波武器系统,开展了大量的作战概念开发、样机研制和演示验证活动,大力推进高功率微波武器发展与部署应用^[1-5]。按作战应用方向可分为两类:一类是反无人机蜂群和巡航导弹的地基/机载高功率微波武器系统,用于保护陆上基地和水面舰艇;另一类是巡航弹载高功率微波武器系统,扰乱陆基、舰载C⁴I系统,获取战场电磁频谱优势,为后续火力打击提供支撑。尽管高功率微波反无人机及其他电子系统效能已经得到验证,但美国仍然很重视高功率微波效应研究。2021年2月26日,美国国防高级研究计划局(DARPA)微系统技术办公室发布名为“波形捷变射频定向能(WARDEN)”的项目公告,希望推动关于极端功率宽带放大器和波形捷变技术的基础研发,将

* 收稿日期:2023-09-11; 修订日期:2023-11-16
联系方式:张帅, zhangshuai@nint.ac.cn。

高功率微波后门攻击的作用距离提高为目前最高水平的 10 倍。美国空军研究实验室 (AFRL) 2019 年 6 月发布的《定向能和基地防御》报告指出要深化高功率微波反无人机和巡航导弹效应机理研究。2021 年 6 月发布的《定向能未来 2060——美国国防部定向能技术未来 40 年远景》报告指出, 尽管高功率微波反电子系统效应已经得到验证, 但在基础物理层面, 对系统电子失效的真正过程知之甚少。本文主要是通过分析上述报告中高功率微波效应研究的相关内容, 归纳总结当前美国高功率微波效应研究进展和研究重点。

1 波形捷变射频定向能 (WARDEN)

WARDEN 项目公告中指出: 现在的高功率微波系统通常都使用振荡器作为射频源, 这些系统工作于固定频率, 不易调谐, 缺乏功率合成所需的相位相干性。前门攻击的高功率微波系统作用距离较远, 但只能作用于指定类型的目标; 后门攻击的高功率微波系统对更多类型的目标都是有效的, 但其作用距离受限于因缺少频率调谐而引起的低电磁耦合效率。捷变波形(包含频率、幅度和脉宽等调制的时域信号, 实现对复杂壳体的最大耦合效率, 在目标内部电子元件和微系统产生扰乱效应)和宽带高功率放大器结合使用, 能够降低后门攻击目标系统的效应阈值, 显著增加高功率微波武器系统的作用距离和有效性。与振荡器相比, 宽带放大器具备频率捷变能力, 可实现与目标电子系统之间的最大化电磁耦合。实验室证实即使只进行轻微的频率调谐, 耦合效率也能显著提高。此外, 波形调制可降低内部电子系统的扰乱效应阈值, 增加高功率微波武器后门作用距离^[6]。

WARDEN 项目旨在提高高功率微波系统的后门攻击距离, 基于开发的电磁响应快速评估模型开展捷变波形效应研究, 给出显著降低电子系统高功率微波效应阈值的波形参数, 然后通过研制的大带宽、高功率放大器进行验证, 最终指导高功率微波捷变波形作战运用。另外项目中还提到“实验室已证实对电磁波的频率、波幅和脉宽进行调制后, 降低了电子元件和系统高功率微波效应阈值”。这说明美国科研人员在电子系统的后门效应研究方面, 积累了足够的效应数据与阈值规律。由图 1 可知, 后门攻击的目标对象是巡航导弹, 目标电子器件是数字电路芯片。由此可知, WARDEN 项目希望 HPM 后门攻击巡航导弹的作用距离提高为目前的 10 倍。

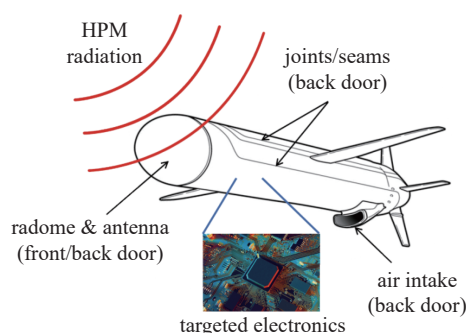


Fig. 1 HPM radiation incident upon a target can couple into the target via front door and back door pathways and cause effects on internal electronics within the target structure^[6]

图 1 HPM 经前门和后门耦合路径进入目标, 在内部电子系统产生 HPM 效应^[6]

2 定向能和基地防御

《定向能与基地防御》报告指出要加深对高功率微波反无人机和巡航导弹的效应理解。从表 1 可知, 对于前门耦合来说, 主要表现为高功率微波经接收天线耦合至微波接收机, 损伤低噪声放大器和限幅器等脆弱组件, 高功率微波效应通常是损伤效应, 同时也可实现类似电子战的翻转效应。对于后门耦合来说, 主要作用对象是包含数字电路的控制/导引系统, 高功率微波耦合至控制线缆(如无人机)和内部电缆(如导弹), 再作用于其内部敏感电路, 高功率微波效应主要是数字电路的扰乱效应^[7]。另外还展示了射频吸收强度随方位角和频率变化关系, 从图 2 中可以看出, 射频吸收强度在 4~6 GHz 最大, 1~1.6 GHz 和 3.4~4 GHz 左右最小, 另外同一频点不同方位角的射频吸收强度也不同。虽然没有指出这幅图的实验对象, 但可以推测应该是无人机或者导弹系统内部某敏感区域。

表 1 深化反无人机和反导高功率微波效应理解

Table 1 Expanded effects understanding in counter-UAS and counter-missile

front door coupling paths	back door coupling paths
<ul style="list-style-type: none"> > HPM field couples to antennas > in-band HPM energy at receiver > vulnerable components: low noise amplifiers (LNAs), limiters > effect is generally damage > can achieve EW-like effects with upset 	<ul style="list-style-type: none"> > control/guidance systems involve digital electronics > HPM field couples to control wires (e.g. UAS), internal cables (e.g. missile) > effect typically disruption of digital electronics

由此可以推断, 近年来美国空军研究实验室效应研究对象的重点应该是无人机和导弹。对于前门攻击来说, 耦合路径明确, 获取了易损器件毁伤阈值, 即可理论计算出无人机和导弹的高功率微波毁伤阈值; 对于后门攻击来

AFRL

HPM Effects

- Expanded effects understanding in counter-UAS and counter-missile

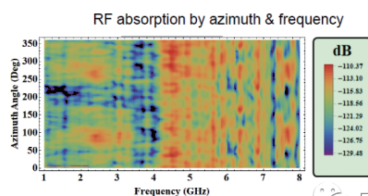
Front Door Coupling Paths

- HPM field couples to antennas
- In-band HPM energy at receiver
- Vulnerable components: low noise amplifiers (LNAs), limiters
- Effect is generally **damage**
- Can achieve EW-like effects with upset



Back Door Coupling Paths

- Control / guidance systems involve digital electronics
- HPM field couples to control wires (e.g. UAS), internal cables (e.g. missile)
- Effect typically **disruption** of digital electronics



THE AIR FORCE RESEARCH LABORATORY

定向能武器

Fig. 2 Introduction of US Air Force Research Laboratory high power microwave effect research^[7]

图 2 美国空军实验室高功率微波效应介绍^[7]

说,耦合路径较为复杂,受目标外壳、内部结构等因素影响,耦合效率(也就是图中提到的射频吸收强度)和微波频率、辐照角度等参数呈现强相关性,获取其中的相关规律对于指导反无人机和反导弹作战具有重要意义。因此,可以认为美无人机和导弹的高功率微波效应研究主要是以后门扰乱效应为主。

3 定向能未来 2060——美国国防部定向能技术未来 40 年远景

《定向能未来 2060——美国国防部定向能技术未来 40 年远景》报告指出,基于电真空器件的高功率微波系统通常是相当大的,主要以地基或船载系统为主,采用数米宽的高增益天线,将微波能量集中在 1 km 左右的战术有效范围内。更大、更高功率的地基高功率微波系统已证实可在数十公里级防御带有射频导引头的导弹,这种系统作用距离的增大是前门攻击实现的,其中高功率微波频率在导弹射频导引头工作频率范围内。由于射频导引头非常敏感,所以高功率微波武器可以有效损坏导引头。在导引头损坏的情况下,导弹可能无法发现或跟踪目标,将会增加导弹的圆概率偏差^[8]。

尽管高功率微波反电子系统效应已经得到明确验证,但令人惊讶的是,在基础物理层面对系统电子失效的真正模式却知之甚少,这也是 2021 年度的研究热点。Clarke 等人在 2019 年研究了微控制器射频效应建模中的相关问题^[9], Cui 等人在 2019 年开展了纳米和微米尺度设备级电磁干扰诱导模拟仿真和实验研究^[10], Dietz 等人在 2019 年研究了随机电源电压导致的 CMOS 反相器随机传播延迟的问题^[11], Lawrance 等人在 2017 年开展了典型 X86 ATX 台式计算机干扰阈值频率相关性研究^[12], Peng 等人在 2017 年研究了集成电路和电子器件系统内电磁干扰分析的高保真、高性能计算算法^[13]。随着这些领域的研究,将会发现反电子系统效应背后的物理机理,到 2060 年,将会出现更多的高功率微波应用和反高功率微波技术^[8]。

最后,报告提出到 2060 年高功率微波发展的技术目标:(1)半导体高功率微波技术实现 GW 级功率;(2)更好地理解高功率微波效应;(3)高功率微波小型化^[8]。

由此可以推断,美国可能已有船载高功率微波系统,并实验验证了 1 km 左右的有效作用距离,也有可能开展了地基高功率微波武器系统数十公里反雷达制导巡航导弹的能力验证实验。从引用的效应研究论文可知,主要研究对象是 CMOS 反相器、微控制器、数字 IC 等,效应机理主要是扰乱效应。2060 年高功率微波发展的技术目标“更好地理解高功率微波效应机理”很有可能指的是数字电路高功率微波扰乱效应机理。另外,也提到了固态高功率微波能够实现非常高的占空比和可定制的波形(设置频率、脉宽、持续时间等参数),具有更灵活可变的高功率微波效应,相比传统高功率微波系统在军事用途方面更具有竞争优势,未来美应该会大力发展固态高功率微波技术。

4 结 论

从美国近年来公布的高功率微波武器样机研制计划、DAPRA 发布的“波形捷变射频定向能(WARDEN)”项目、空军研究实验室公布的《定向能和基地防御》和《定向能未来 2060——美国国防部定向能技术未来 40 年远景》

报告等分析可知,近年来美国高功率微波效应研究呈现以下特点:(1)研究对象重点是无人机和巡航导弹,未见陆基、舰载 C⁴I 系统效应研究报道;(2)研究内容重点是无人机和巡航导弹后门扰乱效应,进一步阐释数字电路的高功率微波效应机理,通过捷变波形研究给出降低电子系统高功率微波效应阈值的波形参数,提高高功率微波武器后门攻击无人机和巡航导弹的作用距离;(3)研究成果瞄准地基/车载高功率微波武器系统基地级防御作战应用。

参考文献:

- [1] 孔令岩, 木木, 王俊. 探秘美国新型高功率微波武器[EB/OL]. (2020-04-29). https://www.sohu.com/a/392071858_99989631. (Kong Lingyan, Mu Mu, Wang Jun. Discover America's new high power microwave weapon[EB/OL]. (2020-04-29). https://www.sohu.com/a/392071858_99989631.)
- [2] 禹化龙, 伍尚慧. 美军定向能武器反无人机技术进展[J]. 国防科技, 2019, 40(6): 42-47. (Yu Hualong, Wu Shanghui. Progress and development trend analysis on US directed energy weapons against unmanned aerial vehicles[J]. *National Defense Science Technology*, 2019, 40(6): 42-47)
- [3] Rachel S C. Microwave weapons moving toward operational use[EB/OL]. (2019-03-20). <https://www.airandspaceforces.com/microwave-weapons-moving-toward-operational-use/>.
- [4] 石峰. 美国海军和空军将联合开展新型高功率微波武器测试[EB/OL]. (2022-07-06). <https://www.cnnnews.com.cn/2022/0706/346731.shtml>. (Shi Feng. The US Navy and Air Force will jointly test new high power microwave weapons[EB/OL]. (2022-07-06). <https://www.cnnnews.com.cn/2022/0706/346731.shtml>.)
- [5] 美国陆军授予 Epirus 公司价值 6610 万美元的 Leonidas™定向能系统合同[EB/OL]. 2023. (The US Army awarded Epirus a 66.1million Leonidas directed energy system contract[EB/OL]. 2023)
- [6] 美国国防高级研究计划局 (DAPRA). 波形捷变 RF 定向能[EB/OL]. 2021. (DARPA. Broad agency announcement: waveform agile RF directed energy (WARDEN)[EB/OL]. 2021)
- [7] 美国空军研究实验室. 定向能和基地防御[EB/OL]. 2019. (US Air Force Research Laboratory. Directed Energy and Base Defense[EB/OL]. 2019)
- [8] 美国空军研究实验室. 定向能未来 2060—美国国防部定向能技术未来 40 年远景[EB/OL]. 2021. (US Air Force Research Laboratory. Directed Energy Futures 2060—Visions for the next 40 years of US Department of Defense Directed Energy technologies[EB/OL]. 2021)
- [9] Clarke T, Guillette D. Modeling radio-frequency effects on a microcontroller[C]//Proceedings of ICEAA Conference. 2019: 1050-1053.
- [10] Cui Y, Darmody C, Goldsman N. Nano & micro scale device-level EMI induced vulnerability: simulations and experiments[C]//Proceedings of the 4th Annual UCOE Review. 2019.
- [11] Dietz D. Stochastic propagation delay through a CMOS inverter as a consequence of stochastic power supply voltage-part I: model formulation[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2019, 61(1): 226-232.
- [12] Lawrence J, Landavazo M, McConaha J. Investigation of frequency dependence of upset threshold in a typical X86 ATX desktop computer[R]. Air Force Research Laboratory Technical Report, DTIC AD1063445, 2017.
- [13] Peng Zhen, Shao Yang, Gao Hongwei, et al. High-fidelity, high-performance computational algorithms for intrasystem electromagnetic interference analysis of IC and electronics[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2017, 7(5): 653-668.