

光学探测系统电磁屏蔽设计与应用

卓红艳¹, 刘志强¹, 彭文¹, 叶鹏², 刘志辉²

- (1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;
2. 四川九洲电器集团有限责任公司, 四川 绵阳 621000)

摘要: 光学探测系统在高功率微波系统运行造成的强辐射、强电磁干扰环境下工作, HPM 产生的强电磁脉冲会通过后门耦合的方式由探测器前端光学镜头进入内部的电路系统造成光学探测系统瞬间黑屏、图像抖动、器件毁坏等现象, 通过采用光学玻璃金属丝夹层的方法研制光窗, 在 $2.4\text{ GHz}\pm 100\text{ MHz}$ 频段内电磁屏蔽性能达到了 65 dB, 同时满足探测目标的光窗透过率的要求。经过应用后表明: 加载了这种电磁屏蔽光窗的光学探测系统在 HPM 工作时图像稳定, 未受到干扰。

关键词: 光学探测系统; 高功率微波系统; 电磁屏蔽; 红外光窗

中图分类号: TN216 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20190412

Design and application of electromagnetic shielding of optical detection system

Zhuo Hongyan¹, Liu Zhiqiang¹, Peng Wen¹, Ye Peng², Liu Zhihui²

- (1. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;
2. Jiuzhou Electrical Equipment Limited Company, Mianyang 621900, China)

Abstract: IR optical detector system can work at strong radiation and electromagnetic interference caused by the operation of high power microwave (HPM) system. The strong electromagnetic pulse generated by HPM will enter the inner circuit system through the front-end optical lens of the detector with the back-door coupling, resulting in the phenomenon of instant black screen, image jitter, electronic device destruction and so on. The optical window was developed by using embedding metal lines into optical materials. These metal lines were made to be a net and to be implanted in the middle of optical glass. The performance of electrical shielding was up to 65 dB in $2.4\text{ GHz}\pm 100\text{ MHz}$ frequency band. It can meet the requirement of the optical window transmittance of the detection target. The application shows that the image of the optical detection system loaded with the electromagnetic shielding optical window is stable and undisturbed when the HPM is working.

Key words: optical detector system; HPM; electromagnetic shielding; IR optical window

收稿日期: 2020-02-07; 修订日期: 2020-03-10

作者简介: 卓红艳 (1972—), 女, 研究员, 硕士, 主要从事通信与系统技术方面的研究。Email: 526756092@qq.com

0 引言

高功率微波 (High Power Microwave, HPM) 是指微波的脉冲峰值率大于 100 MW 以上, 频率在 0.5 G ~ 300 GHz 范围内的电磁脉冲^[1], 目前高功率微波技术是国际上研究的热点, 世界发达国家如美国、俄罗斯、法国等都很重视高功率微波技术的发展^[2], 高功率微波系统中的功率源、磁场等设备运行时会产生强辐射和强电磁干扰, 以及电子学系统在高功率微波环境下的生存能力成为高功率微波技术发展的先导性研究课题, 贯穿于高功率微波技术的发展和应用的全过程^[2]。同时, 以光学探测器为核心的光电系统(或设备)的电磁兼容与强电磁防护设计问题也是近年来 HPM 研究过程中的突出问题^[3]。

光学探测器或视频摄像头 CCD 等类似的光电设备, 在强磁场、强辐射环境下运行时, 会出现瞬间黑屏、图像抖动或条纹的现象, 长时间在这种环境下运行, 最终会导致光电设备发生不可逆转的损坏。因此, 要保证光电探测设备稳定可靠地运行, 就必须开展在 HPM 工作环境下光电系统的强电磁防护技术的研究。

从分析可知, 高功率微波系统运行环境下产生的电磁干扰与普通工业环境下的电磁干扰特点不同, 主要表现为: 一是高功率微波所处的频率较高; 二是高功率微波辐射场强度大, 可直接毁伤电子电路系统、电子元器件, 因此所要求的电磁屏蔽效能高。在较高频段范围内满足高电磁屏蔽效能要求是高功率微波环境下电磁兼容性设计的重点和难点之一。

2.4 GHz±100 M 是高功率微波常用的频率范围之一。要求光电探测系统电磁屏蔽指标为在 2.4 GHz±100 M 频段内, 屏蔽效能不小于 60 dB, 因此文中重点开展基于 2.4 GHz±100 M 频段内光电探测系统的电磁屏蔽技术研究和试验, 也为在高功率微波其他频率范围内的光电探测系统电磁屏蔽设计提供一种可行的解决方案。

1 国内外现状

从能量角度出发, 每个脉冲能量大于 1 J 也可以称为高功率电磁脉冲, 由于脉冲包含的能量极高, 可以暂时性干扰或永久性破坏重要传感器, 毁坏关键电

子部件使系统失灵^[4]。HPM 脉冲对光电探测系统的干扰或毁坏的机理实质上是 HPM 脉冲对其内部的电子或电路设备的破坏过程, 这个破坏过程可以分为耦合、传输和破坏三个阶段, 因此高功率微波防护的基本目的就是减少或阻断微波能量渗透^[4]。在对光电探测系统的干扰损伤过程中, 高功率微波所蕴含的能量主要是以后门耦合的方式进入光电探测系统, 国内外对这种方式主要采取金属屏蔽防护或相应电磁波频率的截止波导管, 比如常用的电磁屏蔽柜、波导管等, 针对光电探测系统, 信号处理部分可以采用金属屏蔽箱防护设计, 但是光学镜头需要探测图像, 镜头处不能用金属防护, 但强电磁脉冲仍然会从镜头处进入内部的内部电路, 导致光电系统异常; 如果在镜头处采用截止波导管的措施, 一方面会影响光学探测器的视场范围; 另一方面在镜头上加装波导管, 安装工艺也较为复杂, 难以实现, 光学镜头的屏蔽性能与可视性能是一对矛盾, 因此, 对光电探测系统光学镜头的电磁屏蔽, 需要设计一种既具有高电磁屏蔽性能, 又不影响光学镜头探测观察目标图像的高电磁屏蔽光窗, 同时在信号传输和接地、电源滤波等方面同时采取措施, 针对不同特性采用不同方法, 从整体上提高光电探测系统的电磁屏蔽性能。

目前, 国内研制生产的电磁屏蔽玻璃主要是用于军用计算机显示器及其他军用电子显示设备, 屏蔽效能主要在 30 ~ 1 000 MHz 频段范围内, 屏蔽指标可以达到 40 ~ 80 dB; 但高频段基本没有考虑过^[5]。在参考文献 [6] 中, 提出了宽频高效的电磁屏蔽 ITO 镀膜玻璃的方法, 采用这种 ITO 金属导电薄膜镀在玻璃表面, 制成电磁屏蔽玻璃。在 1 GHz 频段时, 屏蔽效能最高, 达到 54 dB, 而在 2.4 GHz 时, 屏蔽性能较低, 约为 25 dB, 不满足 60 dB 的指标要求。参考文献 [7] 研究了金属网栅光电性能, 认为网栅的光电特性是矛盾的, 线宽与周期越小电磁屏蔽效果越好。

参考文献 [8] 研究了 ZnS 金属网栅制作工艺, 红外透过率达到了 69%。参考文献 [9]、[10] 分别研究了薄膜型金属网栅的电磁屏蔽性能, 在 30~1 500 MHz 达到了 30 dB 的屏蔽效果, 也不满足 60 dB 的电磁屏蔽性能要求。因此, 从上述分析可以看出, 在较高频率范围实现较高的电磁屏蔽效能, 保证光电探测系统稳定工作, 是文中研究的主要内容。

2 电磁屏蔽光窗设计

根据研制的目标要求,在设计中采用了以下的方法:在两块光学玻璃之间加一层金属网丝(铜丝),然后使用胶粘的工艺,将两片光学玻璃紧紧粘在一起,制备成金属网丝夹层的屏蔽光窗。这个原理还是利用了截止波导管的原理,即金属网丝的每个网眼均可看成一个个小的波导管,电磁波频率高于波导管的截止频率时,可自由通过;电磁波频率低于波导管截止频率时,将会被截止;设金属网丝为矩形,网眼宽度为 W ,则截止频率 f_0 为^[11]:

$$f_0 = \frac{15}{w}(\text{GHz}) \quad (1)$$

但是,这种夹层金属网丝会对光学探测器的成像质量有一定的影响,影响程度的大小与夹层金属网丝的宽度和目数有关。以屏蔽性能要求为不小于 60 dB 夹层金属网丝光学玻璃计算:采用等效电路的方法分析金属网栅的特性。设 g 为金属网栅的线周期, $2a$ 为金属网栅的线宽,厚度为 t 的金属网栅,等效为简单的电感电容并联振荡电路,并且其导纳是电感性的。

在自由空间垂直入射时,当 $t \leq 2a \leq g$,电感性网栅具有归一化导纳:

$$y = f_0 \left[\ln \left(\sin \frac{\pi}{g} \right) \right] \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^{-1} \quad (2)$$

式中: $f=g/\lambda$, f 为归一化谐振波长, λ 为波长,当 $\lambda \geq g$ 时,归一化导纳近似等于:

$$y = -\frac{g}{\lambda} \left[\ln \left(\sin \frac{\pi a}{g} \right) \right]^2 \quad (3)$$

对于 2.4 GHz 的波段, $y^2 \leq 1$,垂直入射的金属网栅的透过率 T 近似为:

$$T(0,0) \approx 4 \frac{g^2}{\lambda^2} \left[\ln \left(\sin \frac{\pi a}{g} \right) \right]^2 \quad (4)$$

则定义的电磁屏蔽效率为:

$$s = -10 \lg(T) \quad (5)$$

计算取 $\lambda=0.125$ m,用光学点扩展函数(PSF)可推导出中心级的透过率:

$$T_0(0,0) \approx k \frac{(g-2a)^4}{g^4} \quad (6)$$

从上述分析可以看出, k 与垂直入射的玻璃透过率有关,由于所用光学玻璃材料厚度不大,光学玻璃本身透过率影响不大。如图 1 所示为线周期不同 g 为 $50 \mu\text{m}$ 时对应的透过率和屏蔽效能,此时取金属线宽为 $9 \mu\text{m}$ 时,可达到 60 dB 的屏蔽效能,则透过率下降到了 0.4 左右。

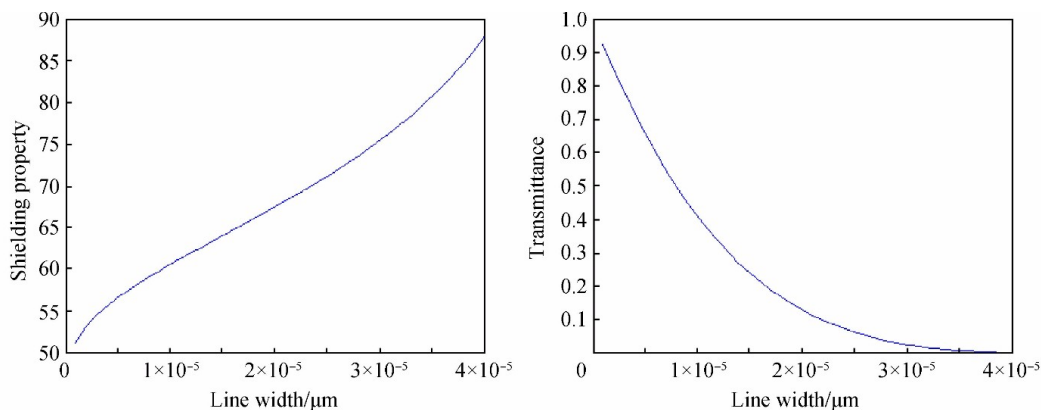


图 1 不同金属网丝线宽度对应的屏蔽效能和透过率。(a)屏蔽效能;(b)透过率

Fig.1 Shielding property and transmittance of different width of metal line. (a)Shielding property; (b)transmittance

从理论计算分析可得,两块光学玻璃之间的金属丝宽度设计为 $9 \mu\text{m}$,可以满足电磁屏蔽性能不小于 60 dB 的指标要求,此时透过率计算为 0.4,需要进一步验证该透过率下光窗对探测图像目标的影响。

3 测试试验及分析

对已经制备的 85 目、100 目和 165 目三种不同目数的屏蔽光窗,以及无屏蔽金属丝夹层的普通光学玻璃和镀有 ITO 膜的光学玻璃五种成品,开展电磁屏蔽

性能和光学透过率的测试比较。采用通过金属屏蔽壳体加载不同的光窗进行测试。其中,输入输出信号采用光缆通信,避免了其他干扰进入金属壳体。

选取测试频率为 1 GHz±100 MHz 和 2.4 GHz±100 MHz 两个频段的范围内,测试结果如表 1 所示。对制备的上述五光学元件光谱特性测试,测得光谱特性曲线如图 2 所示。

表 1 几种光窗屏蔽性能测试结果

Tab.1 Test results of shielding property of different optical windows

No.	Type of optical window	Shielding property /dB(2.4 GHz±100 MHz)	Shielding property /dB(1 GHz±100 MHz)
1	165 mesh	65	48.5
2	100 mesh	51	59
3	85 mesh	60	59.5
4	ITO coating	32	32
5	General window	2	0

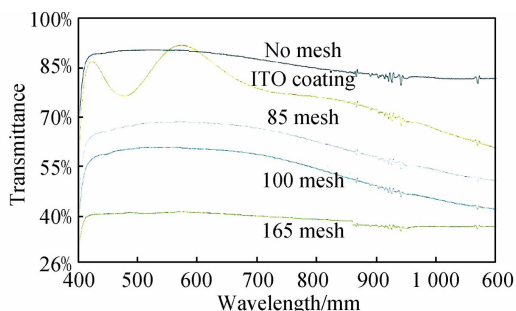


图 2 不同光窗的光谱特性

Fig.2 Characters of optical spectrum of different optical window

在 2.4 GHz±100 MHz 和 1 GHz±100 MHz 的频段内,从几种光窗屏蔽性能测试和结果可以看出,未做屏蔽处理的普通光窗,基本没有电磁屏蔽性能,但在 500~700 nm 波长范围内,透过率较好,达到了 90%; ITO 膜光窗的屏蔽性能小于金属丝网夹层的屏蔽光窗的屏蔽性能,且随着金属丝网目数的增多屏蔽性能增大,但透过率却逐渐降低,加载到 165 目的屏蔽光窗时,屏蔽性能为 65 dB,满足指标要求,但在可见光波段内,透过率约为 40%,成像较暗,为了提高光通量,一方面,可以在屏蔽光窗表面镀涂高透过率光学膜层,透过率可以提升 10%~20%;另一方面,用于图像探测跟踪的系统,可以适当地在软件处理上采用暗目标算法进行补

偿等。开展了对运动目标的探测试验,目标图像如图 3 所示。经过滤波等算法处理后的探测图像如图 4 所示。

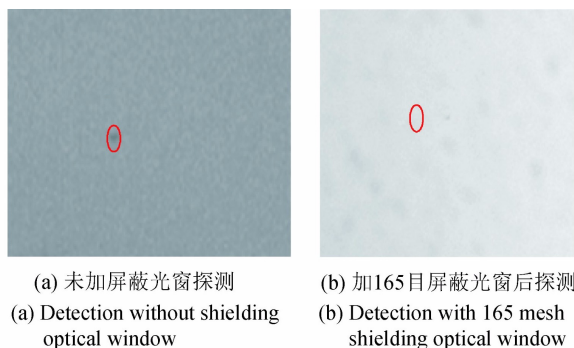


图 3 3.4 km 距离无人机纯天空背景探测目标图像 (视场: 8°×5.3°)

Fig.3 Target image of UAV with clear sky background at 3.4 km (FOV: 8°×5.3°)

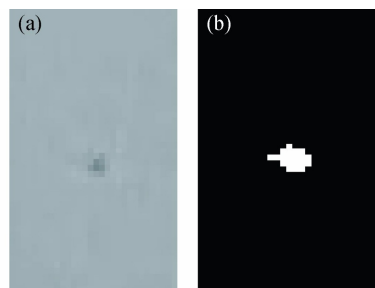


图 4 3.4 km 探测处理后无人机目标图像

Fig.4 Target image of UAV at 3.4 km after processing

根据实测数据推算探测距离,图 4 中加屏蔽窗口后的目标的局部信噪比 PSNR 为 3.8 左右,探测距离为 3.4 km 左右。

$$PSNR = (I - mean(s))mean(im) / std(s)$$

式中: PSNR 为局部信噪比; I 为目标像素的灰度均值; mean(s) 为局部背景区域的均值; mean(im) 为图像区域的均值; std(s) 为局部背景区域的均方差。局部背景是以目标质心为中心,4 倍目标尺寸的区域中去除目标像素后剩下的像素。探测距离主要影响的是大气传输效率,且直接为成正比关系,根据 Modtran 软件计算,3.4 km 距离 (20 km 能见度) 可见光平均透过率为 0.546 2,4 km 计算的平均大气透过率为 0.4924。利用可见光探测光照度与 F 数关系,此时推算出的信噪比大于 3,能够较好的与背景进行区分,即在 4 km 远距离,图 4 中的目标仍能够被探测到。

从电磁屏蔽性能测试和探测试验研究发现,实际研制的电磁屏蔽光窗与设计理论分析结果基本一致,

在 2.4 GHz±100 MHz 频带内电磁屏蔽效能达到了 65 dB,且在能见度 20 km 条件下,在 4 km 处可探测到运动目标。

4 应用及结论

将加载了 165 目的屏蔽光窗安装在光学探测系统的金属屏蔽箱体的前端,采用密封胶密封,屏蔽箱体内部设计为嵌入式迷宫结构,光电探测系统与外部的通信全部采用光纤通信的架构。在一年多的 HPM 系统运行时间内,光电探测系统工作稳定,未出现画面图像闪烁、黑屏或器件受干扰损坏的现象。

研究和试验表明:采用光学玻璃和金属网栅相结合的方法制备屏蔽光窗,既具有高电磁屏蔽效能,在一定程度上也不影响光学镜头图像探测功能,有效解决了在强辐射、强电磁干扰环境下光学系统的电磁防护问题。同时,也可以根据实际要求,选择金属网栅的线宽和目数,制备具有不同屏蔽效能的屏蔽光窗,具有好的应用前景。

参考文献:

- [1] Lin Jingyu, Hou Deting. Summary on developments of HPM technology [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2003(4): 14–17. (in Chinese)
林竞羽, 侯德亭. 高功率微波技术发展概述[J]. 航天电子对抗, 2003(4): 14–17.
- [2] Qian Baoliang. The research status and developing tendency of high power microwave technology in foreign countries [J]. *Vacuum Electronics*, 2015(2): 2–7. (in Chinese)
钱宝良. 国外高功率微波技术的研究现状与发展趋势[J]. 电真空技术, 2015(2): 2–7.
- [3] Liu Jian, Li Yonggang, Huagn Meng. Design of electromagnetic shielding for minitype airborne electric-optical platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 45(9): 0920002. (in Chinese)
刘剑, 李永刚, 黄猛. 小型机载光电平台电磁屏蔽设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 45(9): 0920002.
- [4] Zhu Minpeng, Hou Deting, Cheng Dan. Application and Development of high power microwave technology in foreign countries [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2018(2): 67–70. (in Chinese)
祝民鹏, 侯德亭, 陈丹. 国外高功率微波技术发展及应用[J]. 飞航导弹, 2018(2): 67–70.
- [5] Jiang Yong, Wang Gang. The application of the electromagnetic shielding glass on electromagnetic shielding square cabin [J]. *Shielding Technology & Shielding Material*, 2005(1): 37–39. (in Chinese)
姜勇, 王刚. 电磁屏蔽玻璃在电磁屏蔽方舱上的应用[J]. 安全与电磁兼容, 2005(1): 37–39.
- [6] Li Jiantao, Xu Xiaoli. Research on preparation and electromagnetic shielding properties of ITO coated glass [J]. *Ordinance Material Science and Engineering*, 2009, 32(4): 91–92. (in Chinese)
李建涛, 许晓丽. ITO防电磁辐射玻璃制备方法及其性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2009, 32(4): 91–92.
- [7] Li Xiu, Wang Yu, Xu Yanfang, et al. Photoelectric properties of metallic mesh based on flexographic printing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 43(12): 3295–3299. (in Chinese)
李修, 王瑜, 徐艳芳, 等. 柔版印刷金属网栅光电性能研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 43(12): 3295–3299.
- [8] Chen Yun, Li Yanru, Zhang Hongsheng. Improvement on fabrication technology of metallic mesh based on ZnS [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 131–136. (in Chinese)
陈贇, 李艳茹, 张红胜. 基于ZnS金属网栅制作工艺的改进[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 131–136.
- [9] Liu Xiaohan, Zhao Jingli, Feng Xiaoguo, et al. Electromagnetic shielding of highly transparent inductive mesh [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 80–87. (in Chinese)
刘小涵, 赵晶丽, 冯晓国, 等. 高透光率感性网栅膜的电磁屏蔽[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 80–87.
- [10] Feng Xiaoguo, Zhagn Ge, Tang Yang. Electromagnetic shielding properties of metallic mesh coating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(3): 686–691. (in Chinese)
冯晓国, 张舸, 汤洋. 薄膜型金属网栅的电磁屏蔽特性[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 686–691.
- [11] Wang Wei, Gong Jian, Yang Huaijing. Electromagnetic shielding and electromagnetic shielding glass [J]. *China Building Materials Science & Technology*, 2001(4): 71–72. (in Chinese)
王炜, 龚健, 杨怀京. 电磁屏蔽与电磁屏蔽玻璃[J]. 中国建材科技, 2001(4): 71–72.