

利用拉曼自由电子激光测量目标毫米波散射特性的初步研究*

王明常 陆载通 张立芬 陆 宾 冯诚士 周慧芬 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

徐根兴 陶 巍 梁好臣 肖志河 曹玉婷

(航天工业总公司二院 207 所, 北京 100854)

摘 要 介绍拉曼自由电子激光器应用于目标的毫米波散射特性研究所做的一些探索性工作。自由电子激光器是七十年代中期出现的一种新型强相干辐射源。拉曼自由电子激光输出在毫米波段, 具有高功率、可调谐等优点。利用自由电子激光辐射高能量和宽频带的特点, 研究目标及材料的毫米波散射特性, 开创了新的研究方向和研究途径。具有重大的应用前景。本文在这方面进行了探索性研究, 得到了一些初步结果。

关键词 毫米波, 自由电子激光, 散射。

1 自由电子激光的研究进展和应用

自由电子激光器是七十年代中期出现的一种新型强相干辐射源。它利用强流相对论电子束通过周期磁场, 直接产生韧致辐射。具有高功率、高效率、可调谐等特点。拉曼自由电子激光器利用低能(兆电子伏), 大电流电子束(几千安培), 产生的辐射波长处在微米到毫米波及亚毫米波的范围。其输出功率可达兆瓦以上, 填补了传统激光波长的空白。

高功率毫米波和亚毫米波广泛应用于通讯、雷达和等离子体加热等领域。在可控热核聚变中用于加热磁约束等离子体(在脉冲时间 3 s 内需要平均功率 20 MW), 拉曼自由电子激光是主要候选者之一。正在研制的应用于加热等离子体的高功率自由电子激光, 功率为 1~ 5 MW, 波长为 2 mm(荷兰 FOM 大学); 材料生产要求光源在近红外(2.5~ 100 μm), 用于材料处理, 功率为 1~ 5 kW, 波长为 8~ 20 μm ; 用于向卫星, 空间站等空间目标传输功率, 要求功率为 100 kW~ 1 MW, 波长为 0.86 μm 的大功率自由电子激光都在研究之中。上海光机所于 1985 年建成了我国第一台拉曼自由电子激光器。经过几年的改进和提高, 在 8 mm 波段输出峰值功率达 14 MW, 在 3 mm 波段输出峰值功率达 1 MW。在光学速调管、分布反馈谐振腔、小周期振荡器等自由电子新技术方面开展了理论和实验研究, 并取得了可喜的成

* 本课题为国家自然科学基金和光华科技基金资助项目。

收稿日期: 1996 年 7 月 9 日; 收到修改稿日期: 1997 年 1 月 14 日

果^[1-2]。

海湾战争引起人们对大功率微波研究的重视。拉曼自由电子激光器填补了毫米波段缺少强相干辐射源的空白。它可以输出大功率毫米波是其他器件无法比拟的。在现代电子对抗战中, 大功率拉曼自由电子激光在激光制盲、毫米波雷达和目标反射特性研究等军事上有重要应用。传统的雷达采用连续毫米波入射, 用外差法改变辐射频谱, 需要本机振荡源。新方法采用光栅波谱仪选频, 不需要本机振荡源, 系统大为简化。激光目标探测系统与雷达相比, 具有设备简单, 体积小近场能力强, 信息宽带和角分辨率高等特点。

利用自由电子激光辐射高能量和宽频率的特点, 来研究目标及材料的毫米波散射特性, 探索散射新机理, 寻求新特征, 是一种具有科学和应用价值的新途径, 它打破了传统的毫米波散射特性的研究思路, 采用光学和毫米波相结合的测量研究方法, 是一种值得探索的课题。其在军事上的潜在应用前景也是很广泛的。

2 电磁散射测量的基本原理

雷达是进行电磁散射测量的基本工具。如图 1 所示。雷达系统最基本的组成部分有: 信号源、发射机、发射天线、接收天线(也可能收、发天线合一)、接收机、处理与显示终端。根据电磁散射理论, 电磁波照射到雷达目标上, 目标将按其本身所固有的特性产生一散射场, 向各个方向辐射能量。其中沿接收天线方向的一部分被雷达接收到, 经处理和终端显示得到该目标的散射特性值。电磁散射测量, 是用已知的入射电磁波(已知其波长、功率、极化、入射角)照射目标, 通过测量散射波来确定目标的电磁散射特性。

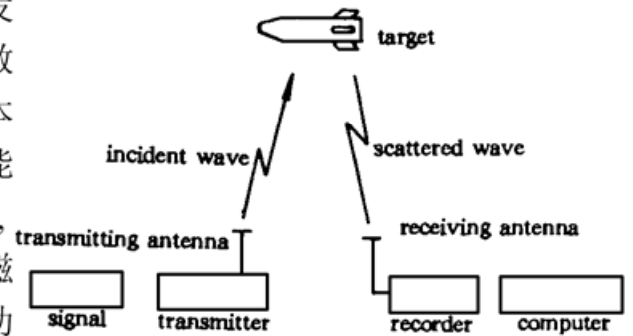


Fig. 1 Diagram of a millimeter wave radar

表征雷达目标电磁散射特性的主要参数是雷达散射截面(简称为 RCS), 以 σ 表示, 单位为 m^2 。它是度量雷达目标对于照射电磁波散射能力的一个物理量。其定义为: 单位立体角内目标朝接收方向散射的功率与从给定方向入射于该目标的平面波功率密度之比的 4π 倍。其表达式有两种形式^[3], 其一是根据电磁散射理论观点, 如(1)式所示。其二是从雷达测量的观点, 如(2)式所示。两者是一致的。

$$\sigma = 4\pi R^2 E_s^2 / E_i^2 \quad (1)$$

式中 E_i 为入射电场强度, E_s 为散射电场强度, $R \rightarrow \infty$ 。

$$\sigma = 4\pi P_r / (A_r / R_r^2) (P_t G_t / 4\pi R_t^2), \quad A_r = G_r \lambda_0 / (4\pi) \quad (2)$$

式中: P_r 为接收机输入端功率(W), P_t 为发射机功率(W), G_t 为发射天线的增益(无量纲), A_r 为接收天线有效面积(m^2), R_t 为发射天线到目标的距离(m), R_r 为目标到接收天线的距离(m), λ_0 为雷达工作波长。

根据雷达散射截面定义, 对某些完全导体的特殊形体、例金属球体, 金属平板, 金属圆柱体等, 理论上可以精确算出来其雷达散射截面值, 可以作为进行散射测量的标准体。雷达散射截面定义中的一个基本要求是平面波照射, 要求发射天线与目标之间满足远场条件:

$$R \gg 2D^2 / \lambda_0 \quad (3)$$

式中 R 为天线到目标的距离, D 为目标的横向扩展尺寸。当然在某些应用中, 还需研究近场雷达散射截面问题。散射测量中最大困难是背景控制。散射测量要测试的是在入射波照射下目标产生的散射波, 因此除待测目标外的任何物体的反射都可能带来测量误差。高精度的散射测量应在微波暗室内进行。

3 试验系统设计

为了利用上海光机所拉曼自由电子激光器作为毫米波信号源进行毫米波目标散射特性测量, 根据散射测量要求, 在原有设备的基础上, 设计加工了测量散射特性的实验系统、研制了毫米波光栅波谱仪、毫米波接收器和微波暗室等一些必要的设施。

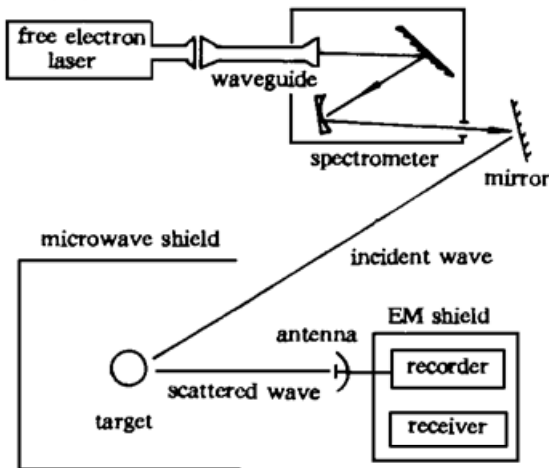


Fig. 2 Experiment set up of a free electron laser application

自由电子激光辐射经波导管最后由输出喇叭输出。毫米波波谱仪接收自由电子激光的输出辐射如图 2 所示。为了达到一定分辨波长的要求, 先将波束扩束到直径 100 mm 的截面, 并变成准直平行波束输出。波束入射角 α 照射到闪射角 $\theta = 30^\circ$ 的光栅上, 光栅常数 $d = 7.5 \text{ mm}$, 刻槽数 $N = 30$, 典型的入射角 $\alpha = 60^\circ$ 。该光栅的波长覆盖范围为 5 mm 到 10 mm, 柱面凹反射镜是用硬质基底上复抛光铜制成的。其曲率半径为 1.5 m, 高 20 cm, 光栅衍射的微波经柱面镜会聚, 在其焦平面上由选通口选择所要求波长的微波输出, 通过调整光栅的角度, 在选通口处可以得到不同波长的微波输出。由波谱仪的具体设计参数和各元件的加工精度, 可以估算出波

谱仪的波长分辨率。如果入射到光栅的波束是平行的, 那么入射角 α 是固定的。由角散射 $d\beta/d\lambda$ 和半底点宽度 $\Delta\beta = \lambda/Nd$, 可以求得分辨率波长 $\Delta\lambda = \lambda/MN$ 。式中 λ 为被测毫米波波长, M 为衍射级数, 取 $M = 1$ 并代入实际的设计参量, 则实测的中心波长 8 mm 处的可分辨波长: $\Delta\lambda = 0.27 \text{ mm}$ 。

进行毫米波散射测量必须要有毫米波接收机。由于拉曼自由电子激光器提供的间歇性的变能脉冲, 其间歇时间约 20 min, 脉冲宽度约 20 ns。要进行变能量且宽度极窄的, 单脉冲接收, 给接收机的设计带来了很大困难。若要进行单脉冲瞬时采样, 其采样速率至少应大于 100 MHz。并且要求极严格的同步信号。这对于本课题的经费而言很难做到。因此本文采用 8 mm 高速检波器作为接收。利用拉曼自由电子激光器原有的示波照相系统作为终端显示, 测量结果均以照片的形式给出。

拉曼自由电子激光器安装在一座大的实验室内, 其环境对电磁散射测量极为不利, 因此, 采用 8 mm 微波吸收材料, 布置成一个简易的微波暗室, 将待测目标置于暗室中, 以尽量避免背景的干扰反射。利用拉曼自由电子激光器进行毫米波散射特性测量装置。拉曼自由电子激光器辐射的宽频带单脉冲, 经毫米波波谱仪选频, 得到一束准直的选择频毫米波。由于正前方的空间太小, 用反射镜改变波的传播路径, 使之转移到一个宽阔的场所, 并在此搭建微波暗室。目标置于微波暗室中, 经反射镜反射后的波为入射波, 照射目标, 目标的散射波经 8 mm 抛物面天线送到接收器中, 最后由高速示波照相系统来拍照记录, 接收机和示波照相系统置于电磁屏蔽室中, 以屏蔽激光器放电时引起的电磁干扰。

4 实验测试与结果

在散射测量中, 入射电磁波是已知的, 通过比较目标散射波与入射波的区别来获取目标特性信息。自由电子激光器的辐射特性(辐射功率、频谱范围、频率调谐特性等)已经作了充分的研究^[4, 5]。在本实验中, 首先观察直射波束检验系统是否正常, 然后进行开环的散射实验。

测试的目标有:

- 1) 直径 20 cm 金属球, 代号 1# 球
- 2) 直径 30 cm 金属球, 代号 2# 球
- 3) 边长 $L_1 = 18 \text{ cm}$, $L_2 = 32 \text{ cm}$ 铝平板, 代号 3# 平板

根据电磁散射理论, 金属球的雷达散射截面由 $\sigma = \pi a^2$ 给定(几何光学区), 式中 a 为球半径。金属平板的雷达散射截面为

$$\sigma = 4\pi L_1^2 L_2^2 \cos^2(\beta/2) / \lambda_0^2,$$

式中 A 为金属平板的面积, β 为雷达双站角(发射天线与目标、目标与接收天线连线的夹角)。通过理论计算得:

1# 球雷达散射截面: $\sigma_1 = \pi a^2 = 0.0314$
 2# 球雷达散射截面: $\sigma_2 = \pi a^2 = 0.0707$

对于雷达双站角 $\beta = 30^\circ$, 雷达工作波长 $\lambda_0 = 0.008 \text{ m}$, 求得 3# 平板雷达散射截面: $\sigma_3 = 4\pi L_1^2 L_2^2 \cos^2(\beta/2) / \lambda_0^2 = 607.8 \text{ (m}^2\text{)}$ 。显然: $\sigma_1 < \sigma_2 \ll \sigma_3$

本文直接将自由电子激光器的辐射用于散射测量和利用毫米波波谱仪对激光器的辐射选频之后用于散射测量。对上述几种目标进行了大量实验, 得到了一些初步的结果。下面给出用示波器拍摄的实验结果。其中, 图 3 是放置在目标支架上处于测试状态下的 1# 球。图 4 是直射波响应曲线。电压幅度 0.5 V/div (下同)。图 5 是 3# 平板响应曲线, 其检波电压 $V_3 = 1.9 \text{ V}$ 。图 6 是 2# 球响应曲线, 其检波电压 $V_2 = 0.70 \text{ V}$ 。图 7 是 1# 球响应曲线, 其检波电压 $V_1 = 0.32 \text{ V}$ 。电压幅度 0.2 V/div。

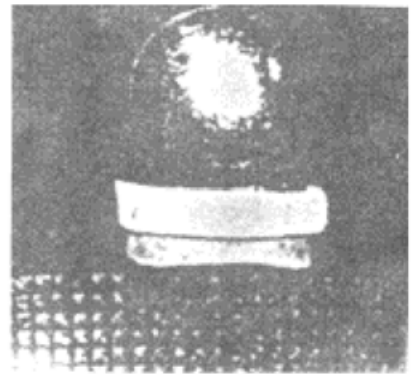


Fig. 3 A ball target 1# under the measurement

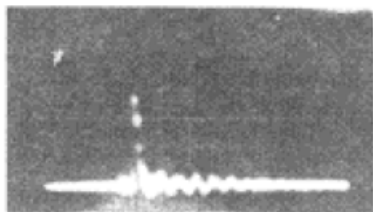


Fig. 4 Receiving signal from incident wave

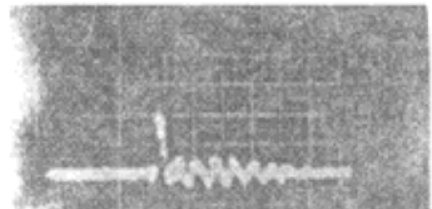


Fig. 5 Scattering signal from plate target 3#



Fig. 6 Scattering signal from ball target 2#

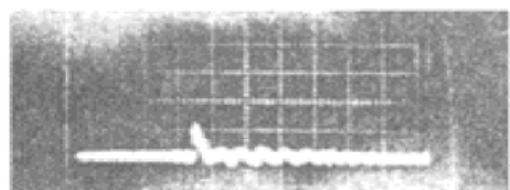


Fig. 7 Scattering signal from ball target 1#

可见, $V_1 < V_2 < V_3$, 与计算求得的目标雷达散射截面相符合。

实验结果表明, 利用拉曼自由电子激光器进行 8 mm 散射测量是可行的。作为一个全新的领域, 这里所做的工作还是探索性的, 有待进一步改进实验装置。

5 结论与建议

自由电子激光作为武器, 取决与激光器的输出功率和目标的特性, 地基自由电子激光器, 要求持续时间上分钟, 输出功率在 400 MW 以上, 目前自由电子激光器在要求的时间内, 功率还达不到所要求的功率值, 这一领域的研究还有待进一步发展。自由电子激光器今后的发展方向是小型化和应用。紧凑、实用的自由电子激光器是这一研究领域里工作的焦点。要求设计小型高性能电子加速器, 产生高亮度电子束, 提高激光器效率。

本课题为建成利用拉曼自由电子激光作为波源的目标散射特性测试系统, 进行了探索性实验。结果表明, 利用拉曼自由电子激光器来研究目标的毫米波散射特性是可行的。但目前组建的这一系统距实际应用还相差一定的距离, 其原因: 一是自由电子激光器的极窄单脉冲发射难于接收和记录, 需要提高重复频率, 才能定量测试目标的散射特性。二是目前自由电子激光器的设备庞大, 需要小型化才能满足地基和机载的要求。

作者相信, 随着自由电子激光技术的进步和利用自由电子激光器来研究目标特性工作的进一步开展, 必将获得典型军事目标(飞机、导弹、坦克等)、隐身材料的准确目标反射特征, 将为军事系统现代化提供一个有效的工具。

参 考 文 献

- [1] 王明常, 王之江, V. L. Granatstein *et al.*, 光学速调管的研究. 光学学报, 1989, 9(7): 608~ 617
- [2] M. C. Wang, Z. J. Wang, J. Z. Chen, Experiments of Raman FEL with Distributed Feedback Cavity. *Nucl. Instr. & Methods*, 1991, A304: 116~ 120
- [3] 黄培康等, 雷达目标特征信号. 宇航出版社, 1993: 12
- [4] M. C. Wang, Waveguide Transmission of a FEL. *Nucl. Instr. & Methods*, 1992, A318: 870~ 873
- [5] M. C. Wang, Z. Lu, L. Zhang *et al.*, Grating Spectrometer for Raman FEL Diagnostic. *Nucl. Instr. & Methods*, 1993, A331: 667~ 669

Applying Raman Free Electron Laser for Measuring Target Scattering at Millimeter Wavelength

Wang Mingchang Lu Zaitong Zhang Lifen

Lu Bing Zhou Huifen Wang Zhijiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Xu Genxing Tao Wei Liang Haochen Xiao Zhihe Cao Yuting

(207 Institute of Aviation Industrial General Company, Beijing 100854)

(Received 9 July 1996; revised 14 January 1997)

Abstract Application of Raman free electron laser for investigating the target scattering is presented. A free electron laser has advantages of high power and frequency tunable at millimeter. The preliminary results of experimental measurement are obtained.

Key words millimeter wave, free electron laser, scattering.