

光调制散射器在近场测试中的应用

杨顺平, 钟哲夫, 李 浩

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】给出以互易原理为基础的光调制散射器测量法的理论推导,采用光电二极管光导开关作为散射器中间部分的光调制单元,设计出了实用的光调制散射器微波测量系统。并利用光调制散射器测量开口波导轴线的近场分布结果,与HFSS仿真结果比较具有良好的 consistency。

关键词 光调制散射器; 互易原理; 近场测试; 开口波导
中图分类号 TM931 文献标识码 A

Using Optically Modulated Scatterer to Measure Radiation Near-Field

YANG Shun-ping, ZHONG Zhe-fu, LI Hao

(School of Physical Electronics, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

Abstract This paper gives the deduction of optically modulated scatterer to measure radiation near-field through reciprocity principle and the structure of the optically modulated scatterer system. An applied optically modulated scatterer system is designed and photodiodes are used as modulation module. Good agreements for the results between the experiment and simulation are obtained.

Key words optically modulated scatterer; reciprocity principle; near-field measuring; open guide

任何测量辐射天线近场方法都会对场产生扰动,传统的方法是用开口波导作为探头进行测量。由于探头和连接电缆都为导体,并且尺寸也比测量的微波波长长,故其对场的影响较大,对于测量远区场不会构成太大的问题,但对于测量近场、导体附近的场、腔体内的场时,就使测量不准确。文献[1]采用一个细小的金属棒作为散射器,用机械旋转的方式对其进行调制,利用互易原理,用一个天线既作为发射天线又作为接收天线的单站方式,在对场扰动很小的情况下准确地得到了场的分布。随后,散射器测量法得到了大量的应用和不断的改进。文献[2]在偶极子中部放入半导体器件,将机械调制改为半导体调制,简化了调制装置。文献[3]将半导体器件换为光敏元件,通过光照的方式实现了对散射器的调制。文献[4]用塑料光纤把调制信号从调制源送到散射器的光敏元件上,提高了调制精度。文献[5]在此基础上对该方法进行了进一步的研究和完善。本文利用光电二极管光导开关作为散射器中间部分的光调制单元,设计出了实用的光调制散射器微波测量系统。

1 光调制散射器测量技术工作原理

光调制散射器测量技术工作原理为:通过在被测场点放置一个很小的散射器,测量该点的场值,通过扫描,得到扫描路径上的整个场分布。通过互易定理可以知道,源 S 在场 P 点产生的场经散射器散射后回到 S 的散射信号和 P 点的场值是成正比的。为了将微弱的散射信号从其他的相同频率的反射信号中分离出来,在散射器的中部连接光电二极管,通过控制光电二极管,改变整个散射器的阻抗特性,达到对散射信号调制的目的。

在接收端,通过解调就可以得到散射器散射回来的信号。因此光调制散射器测量较传统测量方法有很多优点。首先,探头可以做得很小,因此探头对被测场的扰动也很小。其次,没有任何的金属和探头相连,

收稿日期:2005-09-22

基金项目:国家863计划资助项目

作者简介:杨顺平(1976-),男,硕士,主要从事天线测量及天线设计方面的研究。

故连接物对场的扰动也降至很小。同时,由于互易原理的应用,即使散射器与发射/接收天线之间存在复杂路径,测得的值也是准确的。如果采用两个不同长度的散射器进行联合测量,还可将散射器与环境之间的多次反射对测量的影响消除掉。

2 光调制散射器测量基本理论

把微波源等效为一个位于 $r=r_1$ 的偶极子 $P_1 = |P_1| e^{j\omega t}$,其在自由空间 $r=r_2$ 处产生的电场为 $E_{12} = \alpha_1 P_1$, α 为一复常标量。设散射器位于 r_2 处,由于散射器的影响, r_2 处的场强变为 E_2 ,设散射器等效的偶极子的强度为 P_2 ,则:

$$E_2 = \alpha_1 P_1 + \beta_2 P_2 \quad (1)$$

式中 β_2 表征 $P_1=0$ 时散射器和其周围环境关系的复常标量,为 r_2 的函数。对称地可以写出 $r=r_1$ 处的场强为:

$$E_1 = \alpha_2 P_2 + \beta_1 P_1 \quad (2)$$

式中 β_1 表征 $P_2=0$ 时散射器和其周围环境关系复常标量,为 r_1 的函数。由互易原理可知 $\alpha_1 P_1 P_2 = \alpha_2 P_2 P_1$,则 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ 。所以式(1)、(2)中的 α_1 和 α_2 为同一参数,设为 α 。由于散射器被低频调制,则 P_2 与 E_2 的关系为:

$$P_2 = \varepsilon(t) E_2 \quad (3)$$

式中 $\varepsilon(t)$ 为散射器的极化率,因为采用了低频调制,故为时间 t 的函数,由式(1)、(3)可得:

$$P_2 = \alpha \varepsilon(t) P_1 / [1 - \beta_2 \varepsilon(t)] \quad (4)$$

由式(4)、(2)可得:

$$E_1 = (E_{12})^2 \varepsilon(t) / [P_1 (1 - \varepsilon(t) \beta_2)] + \beta_1 P_1 \quad (5)$$

式中 $\beta_1 = \beta_2 = 0$ 表示不考虑外部环境影响时的简单情况。 $\beta_1 P_1$ 表示在没有散射器存在时也会由外部环境反射回去的微波成分。散射器与周围环境的相互作用由 β_2 反映,同时其对 E_1 的影响还会受极化率参数 $\varepsilon(t)$ 的影响, $(1 - \varepsilon(t) \beta_2)$ 反映了考虑周围环境和散射器相互作用时对 E_1 的影响。由于对散射器进行光调制就相当于改变 $\varepsilon(t)$,最后经过解调后测量得到的为 E_1 的变化量 ΔE_1 。

由式(5)可以得到 $\Delta E_1 = [(E_{12})^2 / P_1] [\Delta \varepsilon / (1 - \varepsilon \beta_2)^2]$,如不考虑环境的影响,设测量得到的值为 E ,则:

$$\Delta E = \Delta E_1 \approx \Delta \varepsilon (E'_{12})^2 / P_1 = \Delta K (E'_{12})^2 \quad (6)$$

$$E'_{12} = E_{12} / [1 - \varepsilon \beta_2] \quad (7)$$

$$\Delta K = \Delta \varepsilon / P_1 \quad (8)$$

如果不考虑环境和散射器之间的相互影响(如多次反射),则由式(6)可看出 E_1 与 E 的平方成比例。当散射器很接近天线或者导体周围,或者散射器本身的体积较大时,散射器与周围环境的作用较显著,不能再用品式(6),而应该用品式(7)对结果进行修正。因为式(7)中的 ε 只和散射器有关, β 只和空间位置有关,与散射器无关,故可以通过用两个不同的散射器对同一场进行测量,从而消去 β ,求得 ε ^[5]。由上面的推导可知,只要测量到 E 值,即可得到被测场点值。

3 散射器设计

散射器是一个小的偶极子,长度通常做成小于 $\lambda/2$,中间用光电二极管连接,激光源通过光纤照射到光电二极管上,使其按一定的频率导通和截止,从而使偶极子的阻抗也随相应的频率改变。散射器的长度设计得相对较长时,可获得高的灵敏度,但散射器与测量环境之间的作用也会相应增强,这方面的误差也会相应增加;设计得相对较短时,可以获得高的空间分辨率和小的误差,但同时其灵敏度也会降低。在设计中,应该对二者兼顾考虑。

由于所测量的场的频率为8~12 GHz,故将偶极子的长度设计成10 mm,如图1所示。散射器中间部分的光调制单元为4个光电二极管,总长为1.4 mm,与之相连的金属丝直径为0.5 mm,光电二极管与金属丝用介电常数接近于1的绝缘物质粘贴在一起。光电二极管通过4根普通多模光纤与激光源相连。中间部分光调制器件如果采用GaAs光导开关,可达到更高的调制频率,使测量的误差更小。鉴于制造GaAs光导开关的成本因素,所以采用了光电二极管,其工作频率为10 kHz。图2所示为设计出来的实际的光调制散射器。

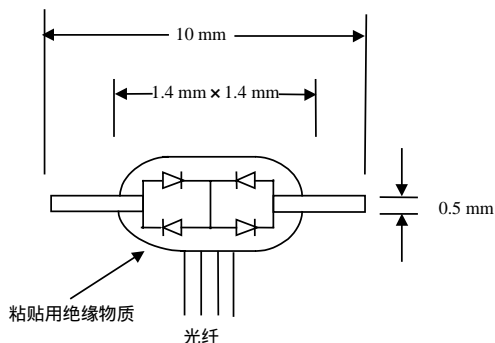


图1 光调制散射器结构



图2 光调制散射器实物图

4 实验

测量系统照文献[6]设计。实验装置如图3所示，被测天线直接采用了BJ100的开口波导，让光调制散射器在开口波导孔径方向的中心轴线上移动，测量这些点上场的幅度和相位分布。为了保证滑动时能比较精确地在中心线上，将光调制散射器固定在一个木板上，木板底部粘有一塑料标尺，木板又放在一大理石板上，大理石板上也粘有一塑料标尺。木板在大理石上滑动，就可带动光调制散射器沿开口波导的中心轴线滑动，通过两塑料标尺上的数值，就可得到光调制散射器与开口波导的距离。实验按每一步1 mm的步距移动，移动的距离为0~200 mm。

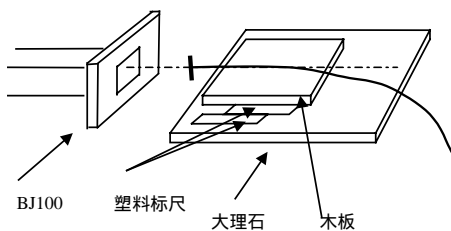


图3 实验装置图

从图4所示可看出测量幅度(归一化到开口波导口面处的电场幅度 E_y)与用HFSS软件计算的结果吻合，从图5所示可看出相位曲线每30 mm变化 360° 。说明该测量方案是可行的。图4的波动主要是由于散射器和波导之间相互作用产生的。通过理论上的分析可知，两路不对称也会引起测量值的波动，不过这两种影响都可以通过一定的数据处理方法进行修正^[5]。

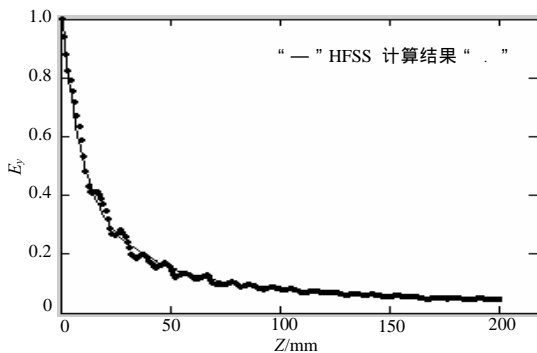


图4 幅值随位置变化曲线

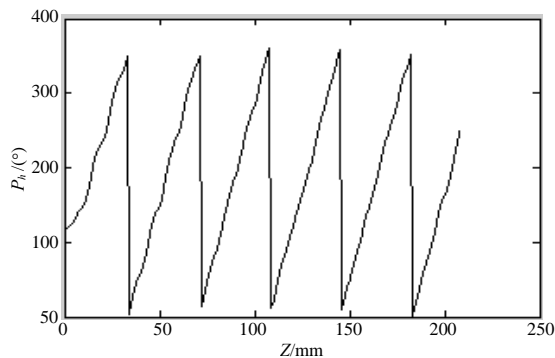


图5 相位随位置变化曲线图

5 结论

由于光调制散射器测量理论以互易原理为基础，并采用单站测量方式，最大限度地减小了测量探头本身对场的扰动，较其他近场测量方法有十分明显的优势。将开发成功的光调制散射器近场测量系统用于开口波导近场测量实验中，得到了满意的结果，在8~12 GHz具有40 dB的动态范围。因此该系统可用于天线、模式变换器、孔缝耦合效应等研究中，应用前景非常广阔。

参考文献

- [1] Cullen A L, Parr J C. A new perturbation method for measuring microwave fields in free space[J]. Proc.IEE, 1955, B102: 836-844.

- [2] Richmond J H. A modulated scattering technique for the measurement of field distribution[J]. Inst. Radio Eng. Trans., 1955, MTT-3: 13-15.
- [3] Lizuka K. How to measure field patterns with photosensitive probes[J]. Electron, 1963, 36: 39-43.
- [4] Hanjnal J V. Compound modulated scatter measuring system[J]. IEEE Proc., 1987, 134:3 50-356.
- [5] Liang W, Hygate G, Nye J F, et al. A probe for making near-field measurements with minimal disturbance: The optically modulated scatterer [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45(5): 772-779.
- [6] 杨顺平, 钟哲夫, 李浩. 光调制散射器辐射近场测试方法[C]//全国第六届高功率微波学术研讨会, 太原, 2004.

编辑 孙晓丹

(上接第779页)

图8所示为热测与模拟的归一化功率密度分布比较, 模拟计算频率为34 GHz, 激励模式为 TM_{04} 模, 实验结果和模拟结果在趋势上基本一致, 表明器件工作在 TM_{04} 模的可能性较大。辐射功率都主要集中在 $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 的范围内, 恰好对应于模式辐射图的亮度区域。

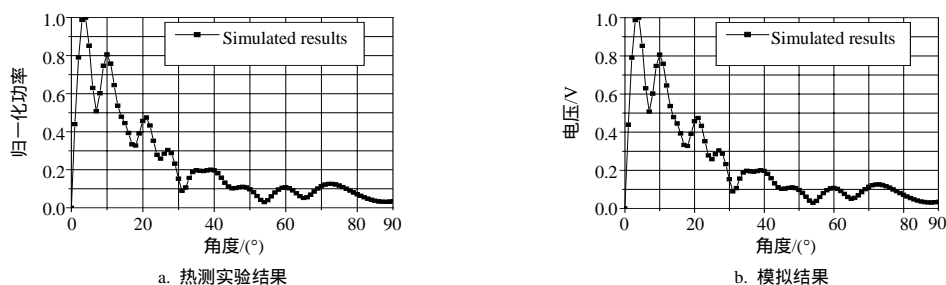


图8 归一化功率密度分布

5 结论

本文采用辐射场空间积分的方法对过模结构的相对论绕射辐射振荡器辐射功率进行了测量。在准确标定测试系统的基础上, 进行了多点、多炮次的热测实验, 得到了器件的辐射方向图。结合辐射模式图和辐射方向图分析, 辐射模式可能为 TM_{04} 模式。通过测试发现电子注的电流为 $8.1 \sim 9.4$ kA, 电压 $560 \sim 670$ kV, 器件输出功率大于 300 MW, 辐射频率在 $34 \sim 38$ GHz之间, 脉冲宽度大于 10 ns, 功率效率大于 5.5% 。对于器件中还存在频率稳定性、效率提高、脉冲宽度增加以及辐射功率的测量中还存在如何更准确地测定辐射方向图、辐射模式等问题, 有待于今后进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] Bugaev S P, Cherepenin V A, Kanavets V I, et al. Relativistic multiwave cerenkov generators[J]. IEEE Trans. on Plasma Sci., 1990, 18(3): 525-536.
- [2] 舒挺, 刘永贵, 谭启美, 等. 多波契仑柯夫振荡器的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(5): 619-622.
- [3] Earley L M, Ballard W P, Wharton C B. New directional couplers for multimode circular waveguides applied to intense pulsed microwave systems[J]. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1985, 32(5): 1985-1999.
- [4] Haworth M D, Englert T J, Lemke R W. Comprehensive diagnostic suite for a magnetically insulated transmission line oscillator[J]. Rev. Sci. Instrum, 2000, 71(3): 1539-1547.
- [5] 李家胤, 熊祥正, 杨梓强, 等. 相对论磁控管的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(4): 563-567.
- [6] 杨梓强, 高喜, 兰峰, 等. 8毫米波段相对论过模慢波器件的实验研究[C]//第四届高能电子学学术交流会, 云南景洪, 2005: 200-203.
- [7] 林昌禄. 天线测量[M]. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1988.

编辑 孙晓丹