

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.04.16

# 光学电磁场探测探针标定技术研究

张思敏, 盛永鑫, 田晓光

(中国电子科技集团公司第 38 研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 光学电磁场探测探针已逐渐开始在相控阵雷达天线测量等领域应用, 它的幅度和相位测量准确度受到大家重视。为了实现对光学电磁场探测探针测量能力准确标定, 本文引入电磁场测量探头的标定思路, 提出利用矩形金属波导的电场产生标准幅度及相位实现对光学电磁场探测探针标定的方法, 建立了标定装置, 阐述标定实施过程。通过实验验证, 该方法能实现对光学电磁场探测探针标定, 精度满足使用要求。

**关键词:** 光学电磁场; 探针; 标定; 幅度; 相位

**中图分类号:** TB97; TN95

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2015)04-0062-03

## Research on Calibration of Optical Electric Field Probes

ZHANG Simin, SHENG Yongxin, TIAN Xiaoguang

(CETC No. 38 Research Institute, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Optical electric field probes have been gradually applied to measure the radiation capability of phased array radar antennas. Therefore, more attention is paid on how to accurately measure the amplitude and phase of this method. This paper introduces the idea of electric field probe calibration, and proposes a method of using electric field of the rectangular metal waveguide to generate a standard signal containing amplitude and phase to calibrate the optical electric field probe's measurement capability. The design and production of the calibration device is elaborated in this paper. Experiment results show that this method is able to calibrate the optical electric field probe's measurement capability, and the precision meets the requirements.

**Key words:** optical electric field; probe; calibration; amplitude; phase

## 0 引言

光学电磁场探测探针(以下简称光学探针)具有测量频带宽、动态范围大、对被测场的干扰小、空间分辨力高、不受外界环境电磁干扰等优点, 这些优点决定了光学探针非常适合于对相控阵雷达天线进行测量校准。目前, 我国已开始研究利用光学电磁场探测技术对相控阵雷达天线进行测量校准, 美国、日本、韩国和法国也在开展类似的工作。如何标定光学探针的幅度和相位测量能力, 提高光学探针对相控阵天线的近场幅度和相位的测量精度, 实现对相控阵天线工作模式下的校准和功效评估, 目前缺少相应的标定方法, 需要研究<sup>[1]</sup>。

直透镜对光纤中激光进行聚焦, 将激光聚焦在电光晶体上, 激光透过电光晶体, 经其端面(镀介质全反射膜)反射返回光纤内。探针前端的电光晶体在外加电场的作用下, 产生电光效应, 其光学折射率分布发生变化, 从而影响在其中传输的激光偏振特性, 经过后端光学主系统的偏振相关检测解调, 将光载波中携带的电磁波信息分离出来, 通过外差相干探测, 获得电磁波信号的幅度和相位信息。因此光学探针和后端的光学主系统在被测电磁场信号与系统最终检测得到的微波信号之间建立了一种对应关系, 这种测量方法的准确性关键取决于探针的标定。

## 1 光学探针工作原理

光学探针的结构示意如图 1 所示, 光纤的尾端连接准

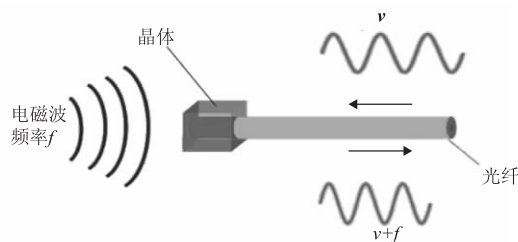


图 1 光学探针的原理图

收稿日期: 2015-03-25

作者简介: 张思敏(1972-), 男, 高级工程师, 主要从事计量测试研究工作。

## 2 光学探针标定方法研究

探针标定又分为幅度标定和相位标定。因此标定过程中主要需要解决三个问题：首先，要获得标准已知的电磁场作为标定参考坐标系；其次，使用的标定方法具有可参考的行业方法；最后，使用的标定设备满足被标定设备的标定需求。

目前电磁场测量探头的标定及校准遵循 IEEE Std 1309-2005 标准。该标准介绍了几种标准场的获取方法，我们拟采用的标定方法是该标准中介绍的基于矩形金属波导的电场相对幅度及相位标定方法。

矩形金属波导作为常规的微波传输器件，具有损耗低、性能稳定、不易受干扰的优点，且在较好的匹配条件下，金属波导的驻波比很低(接负载 VSWR < 1.05)，可以极大消除驻波影响，在金属波导内部形成一个稳定分布的电磁场。相比于微波暗室的天线喇叭辐射场，采用金属波导不仅可以获得更高的电场强度，还可以避免场地带来的影响，更易实现。图 2 所示为金属波导内部电场分布(仅 TE<sub>10</sub> 基模)<sup>[2-3]</sup>。

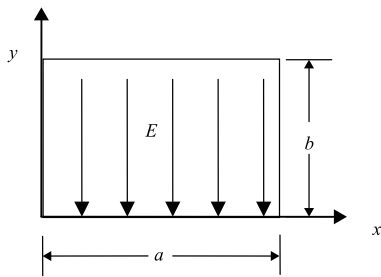


图 2 金属波导内部场强分布图

根据麦克斯韦方程和边界条件，金属波导内部可存在多种电磁波传输模式，除了 TE<sub>10</sub> 基模以外，还存在其他高阶传输模。在作为标准场使用时，通常只保留基模而限制其他高阶模，波导中可传输的模式与传输波的波长及波导截面尺寸  $a, b$  有关。对于每一种传输模，截至频率

$$f_{c_{mn}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

只有高于截至频率的电磁场波才能在金属波导中传播，以金属波导工作频率在 X 波段(8~12 GHz)为例，必须满足：

$$f_{c_{10}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \cdot \frac{\pi}{a} < 8 \text{ GHz}$$

$$f_{c_{01}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \cdot \frac{\pi}{b} > 12 \text{ GHz}$$

$$f_{c_{20}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \cdot \frac{2\pi}{a} > 12 \text{ GHz}$$

即  $2.5 \text{ cm} > a > 1.875 \text{ cm}$ ,  $b < 1.25 \text{ cm}$ 。符合该尺寸的金属波导满足 X 波段仅存在 TE<sub>10</sub> 基模要求。

当仅有 TE<sub>10</sub> 存在时，波导中的电场强度  $E$  可表示为

$$E = \frac{-j\omega\mu a}{\pi} A_{10} \sin \frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z}$$

由上式可见，电场在  $y$  方向是均匀分布的，在  $x$  方向呈正弦分布，在波导中间位置具有最大值和最低的变化率，当向金属波导中注入功率  $P_{\text{net}}$ ，则波导中心处的电场可以表示为

$$E = \left\{ \frac{2\eta P_{\text{net}}}{ab} \left[ 1 - \left[ \frac{f_{c_{10}}}{f} \right]^2 \right]^{-1/2} \right\}^{1/2}$$

当金属波导中为空气介质时， $\eta = 377 \Omega$ 。注入金属波导的功率  $P_{\text{net}}$  可以通过双定向耦合器结合两台功率计获得<sup>[4]</sup>，其方案如图 3 所示。

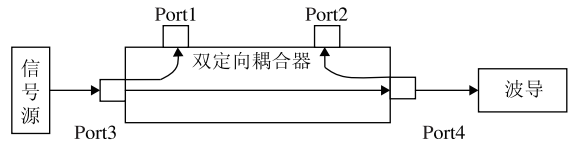


图 3 注入功率测量方法

$$P_{\text{net}} = C_{\text{fwd}} P_1 - C_{\text{rev}} P_2$$

式中： $C_{\text{fwd}}$ ， $C_{\text{rev}}$  分别是前向耦合系数与反向耦合系数，通过矢网标定。通过监控 Port1，Port2 的功率值就可以获得准确的  $P_{\text{net}}$ ，进而获得波导中心处的场强。

在使用矩形金属波导中的稳定已知电磁场对电场探针进行标定时，探针必须插入波导并停留在场强最大的中心位置，通常采用在金属波导侧壁开口的方法，当开口尺寸不超过侧壁尺寸 1/3 时，对金属波导内部的场分布影响较小，光学探针的尺寸约为 1~2 mm，且为光学介质材料构成，具有低侵入性，满足标定要求<sup>[5]</sup>。

## 3 光学探针标定实施

利用矩形金属波导产生标准的电磁场，对光学探针进行标定。具体方案原理如图 4 所示<sup>[6]</sup>。

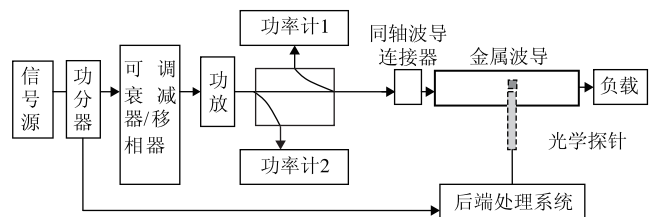


图 4 光学探针标定方案原理框图

信号源输出射频信号进入功率放大器,放大至需要的输出功率,通过双定向耦合器馈入矩形金属波导,在波导中形成稳定的电场分布,在波导金属侧壁上开小口,将光学探针插入并固定,使光学探针头处于金属波导中心位置,该位置处的电场强度与注入波导的能量存在对应关系,因此通过功率计监控注入的能量可以得到金属波导中心位置处的电场强度,以此为依据对光学探针进行标定。

对于相控阵雷达天线来说,天线的辐射方向图是评价天线最重要的指标。相控阵雷达天线众多天线阵元之间的辐射场的相对幅度是影响天线辐射方向图的最重要因素,因此需对光学探针对电场幅度的相对变化的响应进行测量标定。如图4所示,搭建好系统,监控功率计1,2的显示,调节功放与衰减器的搭配,使金属矩形波导馈入所需的功率,观察后端处理系统的读数并记录;不断调整衰减器,稳定后记录后端处理系统读数,获得该频点下的电场强度线性响应曲线。更换其他工作频点,重复上述操作,即可获得所有频点下的电场强度测量曲线,对这些离散数据进行处理,数值拟合,可以获得完整的工作频带内的响应曲线,以此为基础对光学探针及后端处理系统进行线性修正以获得全测量范围内的线性响应区,从而达到幅度标定。

相控阵雷达天线更多关注的是相对相位的变化,因此对相位标定时,需要对光学探针及后端处理系统的相位测量线性进行标定修正。图4不仅可以测量电场的幅度信息,还可以给出电场的相对相位信息,不断改变移相器,记录后端处理系统的相位读数,获得相位测量线性数据。变换其他频点,重复上述操作,获得整个工作频带内的相位响应,通过数值方法进行拟合即可获得相位响应线性曲线,以此作为对光学探针及后端处理系统相位测量线性响应的修正依据。

#### 4 实验验证

将光学探针标定方案原理框图中可调衰减器/移相器用标准件代替,进行光学探针标定方法准确性的验证。

光学探针幅度标定准确度验证时,使用的标准件是选用经上级计量单位校准过的可调衰减器。通过改变衰减器衰减量,记录光学探针及后端处理系统的读数变化,以此来验证光学探针幅度标定方法准确性。具体验证数据如表1所示。

表1 光学探针幅度标定准确度验证数据

频率/GHz	标称值/dB	实测值/dB	误差/dB
10	10.06	9.98	0.08
	20.09	19.99	0.10
	30.10	29.98	0.12
	40.16	40.02	0.14
	50.22	50.06	0.16

光学探针相位标定准确度验证时,使用的标准件是经上级计量机构校准过的可调移相器。通过改变移相器移相量,记录光学探针及后端处理系统的读数变化,以此来验证光学探针相位标定方法准确性。具体验证数据如表2所示。

表2 光学探针相位标定准确度验证数据

频率/GHz	标称值/(°)	实测值/(°)	误差/(°)
10	11.26	11.05	0.21
	22.45	22.10	0.35
	45.10	44.71	0.39
	90.60	99.08	0.52
	179.76	179.16	0.60

验证表明在X波段,光学探针使用矩形金属波导中的稳定已知电磁场进行标定时,幅度误差在0.20dB以内,相位误差在0.60°以内,优于传统的天线近场测量系统的指标。

#### 5 结论

采用矩形金属波导的电场产生标准幅度及相位实现对光学探针标定的方法,建立了微波信号与光学信号的幅度和相位关系,解决了光学探针幅度和相位标定的难题,且准确度高于微波暗室近场幅度和相位测量准确度,为光学探针在相控阵雷达天线测量工程应用提供了关键性技术支撑。

#### 参考文献

- [1] 李海鸥,李思敏,陈明,等.微波光子技术的研究进展[J].光通信技术,2011(8):26-26.
- [2] 国防科工委科技与质量司.无线电电子学计量[M].北京:原子能出版社,2002.
- [3] 梁琼崇,王实.1~18GHz电场探头校准技术研究[J].电子产品可靠性与环境试验,2013(6):46-47.
- [4] 吴万春.电磁场理论[M].北京:电子工业出版社,1985.
- [5] 王奇峰.光纤磁场传感器换能器及系统研究[D].成都:电子科技大学,2005.
- [6] 黄春阳.三维电场矢量微波光子检测器集成天线的设计与优化[D].成都:电子科技大学,2011.