

# 电光晶体电场探头技术方案

编 制： 李士刚

审 核： 陈维青

批 准： 张文翰



**西安维国电子科技有限公司**  
XI'AN WEIGUO ELECTRONIC TECHNOLOGY CO. LTD

## 1、 产品技术性能指标

实物照片：



光电探头



测量主机

性能参数

性能	典型值	单位	备注
探头 1 场强测量范围 (时域量程)			3.3 kV/m-100kV/m(更高场强可定制)
探头 2 场强测量范围 (时域量程)			1.7 kV/m-50kV/m
探头 3 场强测量范围 (时域量程)			0.3kV/m -5kV/m
工作频率	1M-10G	Hz	该频段内频域响应幅度小于 20dB, 可根据客户需求定制。
脉冲响应时间	<0.1	ns	可定制
探头尺寸	5×15×65	mm	
探头类型	单轴向		
RF 输出阻抗	50	欧姆	
RF 接口	SMA		

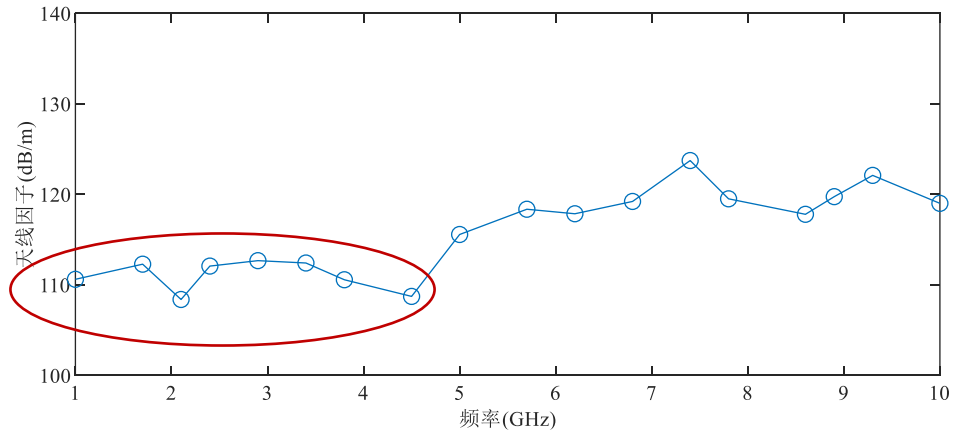
### 关键指标解读

- 瞬态脉冲功率测量范围：100mW/cm<sup>2</sup>~100W/cm<sup>2</sup> (动态不小于 30dB)

换算成场强为：614V/m-20kV/m，1个探头即可覆盖该范围，可实现。

- 可检测瞬态脉冲的频率范围：0.6~4GHz；

可实现，探头在不同频点的天线因子有小幅度波动，波动范围在 $\pm 3\text{dB}$ 之间，见下面校准结果。



- 脉宽测量范围：0.3ns~1 $\mu\text{s}$ ；

可实现，探头和主机内部光电探测器的响应时间为 0.05ns，远小于要求的脉宽。

## 2. 技术方案

### 2.1 光电探头设计方案

宽频瞬态强电场具有上升沿快、持续时间短、峰值场强高（从几 kV/m 到百 kV/m）、频谱范围宽（从几十 Hz 到 GHz）而且时域波形在传输、辐射过程中易发生畸变等特点。这不仅要求电场传感器具有较宽的动态测量范围及宽频率响应范围，同时为实现电场空间分布的“点探测”，脉冲电场探头需体积微小、空间分辨力高，以准确构建空间电场的空间分布状态。最后，为保证检测结果的准确性，电场传感系统需具有较高的探测灵敏度和良好的抗电磁干扰性。

面对这一需求，项目提出一种基于非对称直波导马赫增德尔干涉

效应的宽频电场测量技术，如下图 2.1 所示，传感器的基本结构包括 LiNbO<sub>3</sub> 晶体衬底、非对称马赫-泽德干涉型的光波导以及制作在光波导两侧的金属电极和锥形天线构成。被测空间脉冲电场经锥形天线馈送到光波导两侧的电极上，形成感应电场。由于 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的电光效应，晶体的折射率会改变从而引起波导中传播光的相位变化，通过非对称干涉效应将光相位转换为光强度变化。使用光电探测器进行光电转换即可获得被测空间电场的信息。

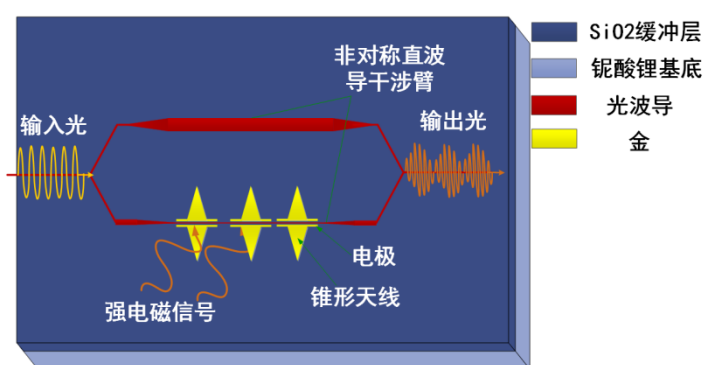


图 2.1 宽频电场探头内部结构示意图

与传统的电场测量系统相比，项目所提出的这种集成光子脉冲电场传感方法的优势在于：①利用光子信号进行传感和传输，具有**很强的抗电磁干扰能力**；②光波导结构的物理尺寸为毫米量级，**传感探头体积微小**，具有较高的空间分辨率，可实现电场空间分布的“点探测”；③电光晶体的电光效应源于外界电场作用下晶体内部电荷的重新分布引起的晶格畸变，而晶格畸变速度为亚皮秒量级，因此，集成光子电场传感器**频带宽**、具有高达百 GHz 的频率响应；④**击穿场强高**。铌酸锂晶体的击穿场强值约为 24MV/m，因此采用这种材料制作脉冲电场传感探头，可实现瞬态强电场的有效检测；⑤传感器的输入和输

出均是光纤，易于构建分布式传感网络、易于实现电磁脉冲的远距离测量。

### 2.1.1 基于非对称直光波导臂的干涉仪结构设计

由马赫-泽德干涉仪的电光调制理论可知，项目提出的非对称集成光子脉冲电场传感器输出的光强为：

$$P_{out} = \eta \cdot P_{in} [1 + k \cdot \cos(\varphi_0 + \varphi(E_z))] \quad (1)$$

式中， $P_{in}$  和  $P_{out}$  分别为输入和输出光强， $\eta$  和  $k$  分别是传感器的传输损耗和传输光谱的消光比。 $E_z$  为施加到晶体  $z$  方向的外界电场强度。对于 X 切 Y 方向传光的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体而言，在  $E_z$  作用下，光波导内传输的光波相位变化为：

$$\varphi(E_z) = \frac{2\pi\Gamma n_e^3 \gamma_{33} L_{el}}{\lambda_0} E_z = \frac{\pi}{E_\pi} E_z \quad (2)$$

式中， $\Gamma$  是波导两侧天线的场增强因子， $n_e$  与  $r_{33}$  为 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的 e 光折射率与电光系数。 $L_{el}$  是波导两侧电极的长度， $\lambda_0$  是输入光源的工作波长。 $E_\pi$  则为半波电场强度，决定了传感器的测量范围。

$$E_\pi = \frac{\lambda_0}{2\Gamma n_e^3 \gamma_{33} L_{el}} \quad (3)$$

式 (1) 中， $\varphi_0$  是干涉仪的固有相位差，如果可以控制  $\varphi_0 = \pi/2 \pm n\pi$ ，同时令  $\pi E_z / E_\pi \ll 1$ ，那么式 (1) 就可以变换为：

$$P_{out} = \eta \cdot \xi \cdot P_{in} \left[ 1 - k \cdot \sin\left(\frac{\pi}{E_\pi} E_z\right) \right] \approx \eta \cdot \xi \cdot P_{in} (1 - k \cdot \frac{\pi}{E_\pi} \cdot E_z) \propto E_z \quad (4)$$

从式 (4) 可以看出，此时传感器的输出光强与外界电场的幅值成线性关系。干涉仪的固有相位差取决于干涉仪两波导臂的光程差：

$$\varphi_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_{effA} L_A - n_{effB} L_B) \quad (5)$$

式 (5) 中,  $n_{\text{eff}A}$ ,  $n_{\text{eff}B}$ ,  $L_A$  和  $L_B$  分别是干涉仪两波导臂的等效折射率与臂长。当环境温度变化时, 由于热光、热胀等效应, 波导臂的折射率和臂长会变化, 因此, 传感器的工作点会随着环境的变化而发生漂移, 从而导致传感器的稳定性较差。

为了解决该问题, 我们研究了  $\varphi_0$  与干涉仪的结构参数间的相关关系, 结果如图 2.2 所示。从图中可以发现  $\varphi_0$  不仅与两波导臂的折射率和臂长有关, 还与光源的工作波长有关。并且, 干涉仪两波导臂的光程差越大,  $\varphi_0$  对工作波长的依赖程度就越高。当光程差大于  $62 \mu\text{m}$  时, 传感器输出光谱随波长变化剧烈, 在 C 波段 (1530-1565nm), 可以变化一个周期。此时, 控制光源的工作波长, 就可以控制传感器的工作点, 从而保证传感性能的长期稳定性。

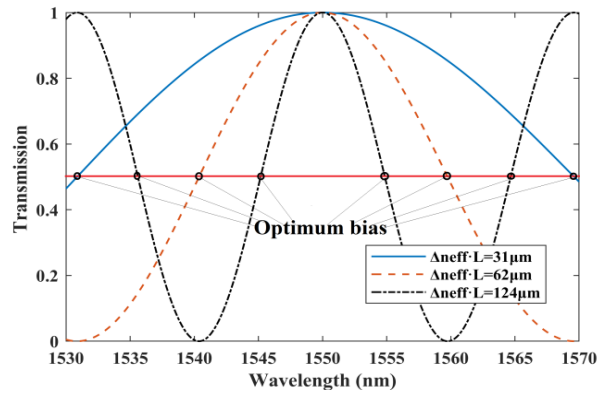


图 2.2  $\varphi_0$  与干涉仪的结构参数间的相关关系

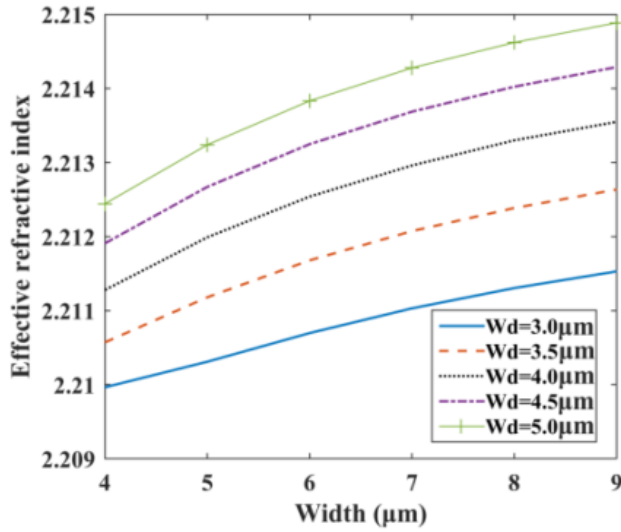


图 2.3 波导臂的等效折射率与尺寸之间的关系

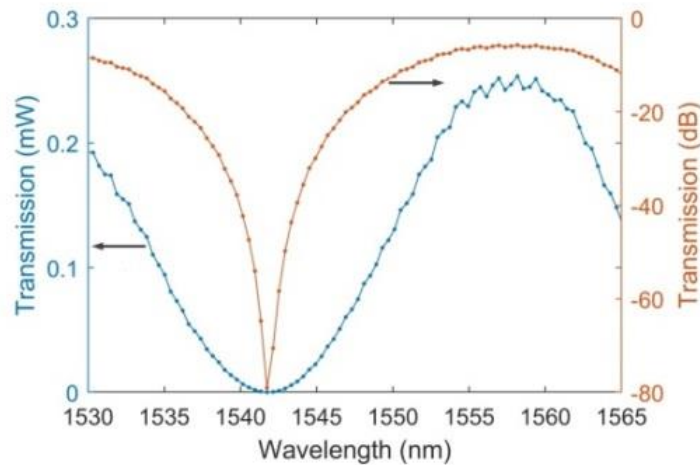


图 2.4 非对称干涉仪的输出光谱图

因此，项目设计的非对称集成光子电场传感基本结构如图 2.1 所示，马赫-泽德干涉仪的两波导臂的宽度（分别为  $9\ \mu\text{m}$  和  $5\ \mu\text{m}$ ）和厚度（分别为  $4\ \mu\text{m}$  和  $3\ \mu\text{m}$ ）不同，形成非对称干涉效应。图 2.4 为项目设计的传感器的输出光谱图，从图中可以看出，传感器输出光功率随波长变化在 C 波段，可以变化一个周期。当环境温度变化，工作点偏移，控制光源的工作波长值，就可以追踪传感器的工作点。并且，

从图 2.4 还可以看出, 由于两波导臂均为直波导, 无弯曲损耗, 传感器的传输损耗仅为 6dB, 传输光谱的消光比达到近 70dB, 可以保证传感器的时域范围 100 V/m-100 kV/m, 频域范围 1V/m-100 kV/m 的动态测量范围。

### 2.1.2 宽频天线结构设计

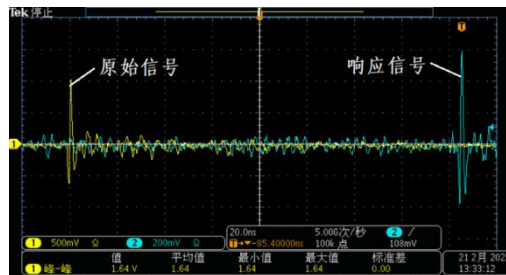
由上文的理论推导, 我们知道非对称集成光子脉冲电场传感器输出的光强与外界电场之间的关系式为:

$$P_{out} = \eta \cdot \xi \cdot P_{in} (1 - k \cdot \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \Gamma \cdot n_e^3 \gamma_{33} L_{el} \cdot E_z) \quad (6)$$

式中,  $\Gamma$  为波导两侧天线的场增强因子, 其值与天线的结构设计有关:

$$\Gamma = \frac{\lambda \sqrt{GZ}}{W_s \cdot \sqrt{4\pi Z_0}} \quad (7)$$

式中,  $W_s$  为波导两侧电极之间的间距,  $G$  为天线的增益,  $Z$  为天线阻抗,  $\lambda$  为被测脉冲电场的波长。从式中可以看出, 首先, 与传统天线 50 欧姆或 75 欧姆的阻抗匹配设计要求相比, 集成光子电光传感器天线的阻抗应尽可能高, 此时传感器的场增强因子较高, 传感器的电场测量灵敏度也就越高。同时, 从式 (7) 我们可以看出, 传感器的场增强因子与被测电场的波长即频率有关, 优化设计天线的结构形状可改变传感器的频率响应范围 (带宽)。



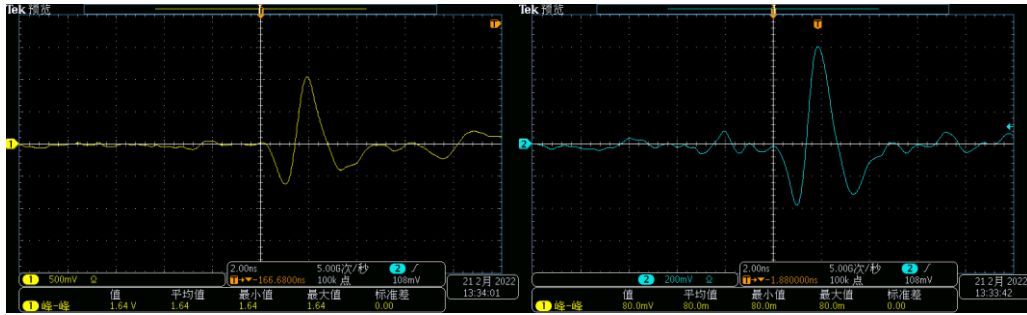


图 2.5 传感器对 50kV/m 的纳秒脉冲电场的响应

为满足传感器的宽带特性,项目提出一种锥形天线结构,如图 2.1 所示,锥形天线为阻抗渐变型结构以及向外无限延伸的尺寸,其阻抗从顶端到低端逐渐增大,能够减少天线谐振现象,同时,为了减少不连续性结构的引入,优化阻抗匹配,将锥形天线的底部设计为渐进圆形,从而增大传感器的带宽。图 2.5 为项目所设计的传感器对 100kV/m 的纳秒脉冲电场的响应。被测纳秒脉冲场强 100kV/m,脉冲上升时间 0.57ns,下降时间 0.98ns。传感器的响应脉冲上升时间 0.56ns,脉冲下降时间约为 1.0ns,波形与原始信号波形基本一致。从图中可以看出,传感器能够真实还原纳秒脉冲电场信号的时域波形。可以达到项目指标。

### 2.1.3 高速信号光电转换技术

项目采用基于窄线宽激光器法将传感器输出光谱的变化转换为光强变化。当传感器输出的透射频谱在被测电场信号影响下发生变化时,固定波长处的激光光强就会发生变化。探测该光强的变化,就可以获得被测电场的准确信息。传感器的测量系统如图 2.6 所示,由 C 波段的可调谐窄带激光源、偏振控制器、传感器、光分路器,高速光电探测器、相位反馈控制系统和示波器组成。可调谐激光源输入光经

过偏振控制器依次进入传感器和 1:9 的光分路器进行分光。10%的探测光进入光电探测器 1 进行光电转换后进入相位控制系统。相位控制系统可以实时控制传感器的工作点，以消除外界环境（温度、振动、压力等因素）对传感器的稳定性的影响。90%的光进入光电探测器 2 进行光电转换后进入示波器。示波器即可实时显示被测脉冲信号的时域波形。

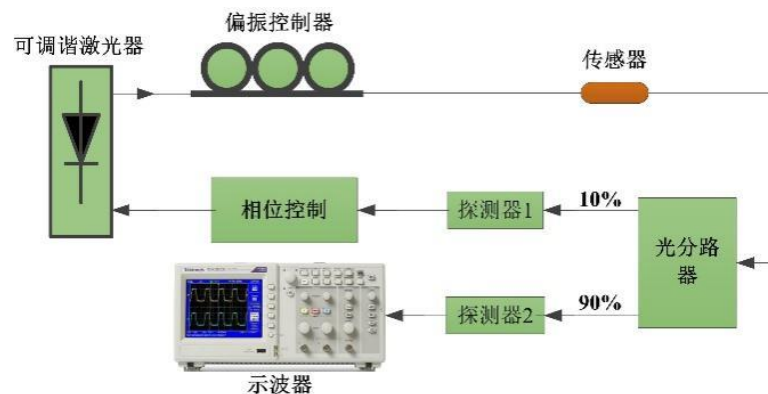


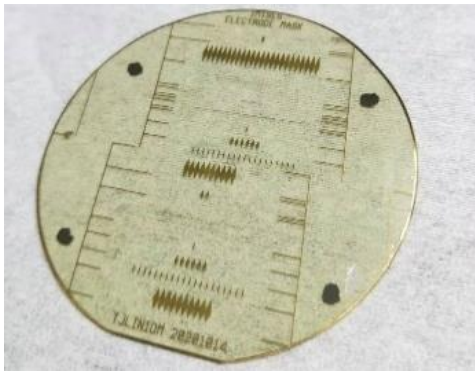
图 2.6 基于窄线宽激光器法的波长光强转换解调系统

该电场传感系统由多个单元组成，因此系统中每一个单元（主要包括电场传感器和光电探测模块）的带宽都将影响传感系统的整体带宽。此外，实际测试时为了不约束到传感系统的整体带宽，还应保证使用的电缆、连接头、示波器等带宽都大于等于传感系统的带宽。考虑到目前射频电缆、射频连接头、示波器等带宽均可达到几十 GHz。而目前商用的高速光电探测器的响应速度以及  $\text{LiNbO}_3$  电光晶体的电光效应发生的时间均在皮秒量级。因此，项目研制的电场传感器的固有带宽可超过 18GHz。

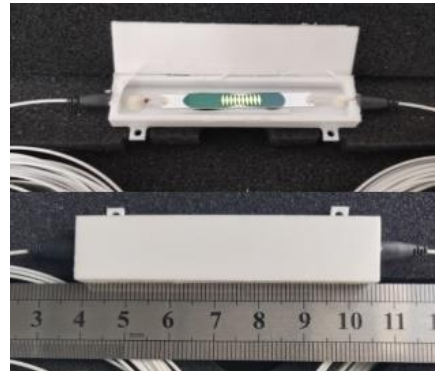
#### 2.1.4 光电探头制备环境及部分测试结果



(a)波导制备实验室



(b) 波导制备过程



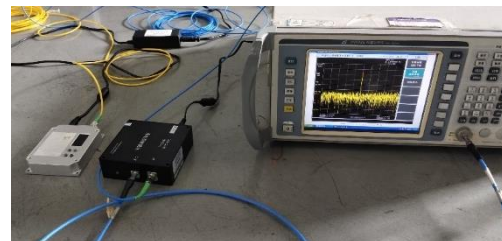
(c) 探头实物图

图 2.7 传感探头制备条件、过程及探头实物图

图 2.7 为传感探头制备条件（波导制备实验室）、波导制备过程图及探头实物照片。图 2.8 为项目研制的传感探头部分现场测试实物照片。该传感探头已实现  $10\text{kV/m}$ 、 $\text{ns}$  量级的脉冲电场信号测量和  $18\text{GHz}$  微波环境测量。



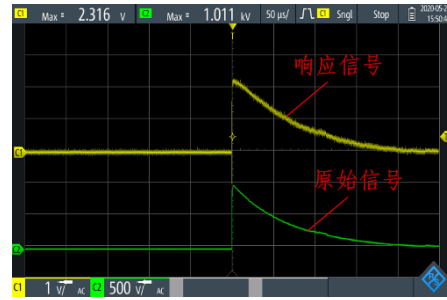
(a) 微波环境测试过程



(b) 微波测试部分结果



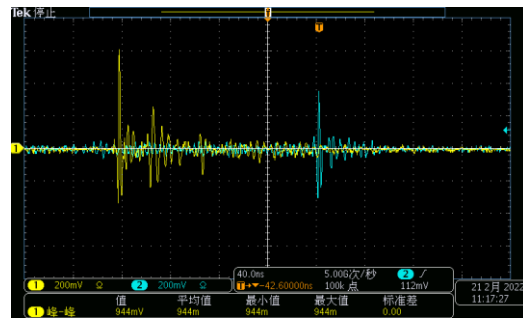
(c) 雷电环境测试过程



(d) 雷电环境测试部分结果



(e) 纳秒脉冲测试过程



(f) 纳秒脉冲测试部分结果

图 2.8 电场传感器及部分现场测试实物照片

## 2.2 测量主机设计方案

### 2.2.1 光发射模块软硬件设计

光发射模块主要由可调谐激光器、微机控制单元、光电转换和跨阻放大单元组成。

#### 2.2.1.1 可调谐激光器

可调谐激光器采用 emcore 公司生产的一款高性能电调谐激光器 TTX1995，激光器实物图如下图 2.9 所示。此光源模块的波长可调谐范围为 1528nm-1563nm，在此波长范围内覆盖了 89 个通道，通道与通道之间的切换速度小于 10s，通道之间的步长间隔为 0.4nm，最高输出功率为 13dBm，最大线宽为 100KHz，该光源接口兼容国际光互

联论坛规定的集成可调谐激光器模块多源协议 OIF-ITLA-MSA。可通过 RS232 与外部控制器通信，实现对波长和输出功率的控制。



图 2.9 emcore TTX1995 激光光源

### 2.2.1.2 主控单元电路及其设计

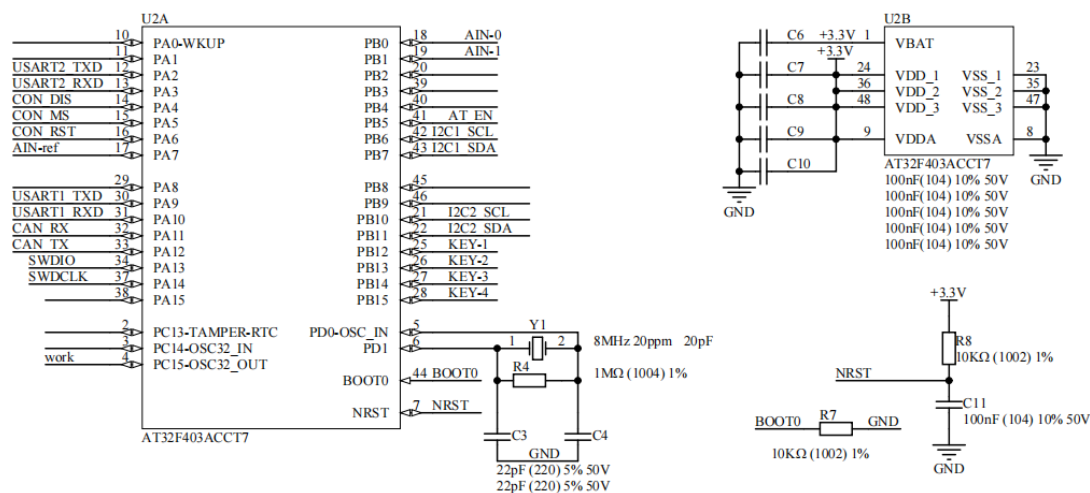


图 2.10 主控单元电路原理图

可调谐激光器的控制单元选用 AT32F403ACCT7 芯片。该芯片使用高性能的 ARM® Cortex® -M4F 32 位的 RISC 内核，工作频率为 240 MHz, 内置 256K 高速存储器, 包含 2 个 12 位的 DAC、8 个 UART 接口、可工作于 -40 °C 至 +105 °C 的温度范围，供电电压 2.6 V 至 3.6 V, 可以满足可调谐控制器控制及光电转换单元使用要求。芯片最小系统原理图设计如下图所示。

### 2.2.1.3 串口电路设计

可调谐激光器通过 RS232 与主控单元通信，供电电压为+3.3V、-5.2V。为保证稳定可靠的通信，内部设计了电平保持电路，如下图所示。

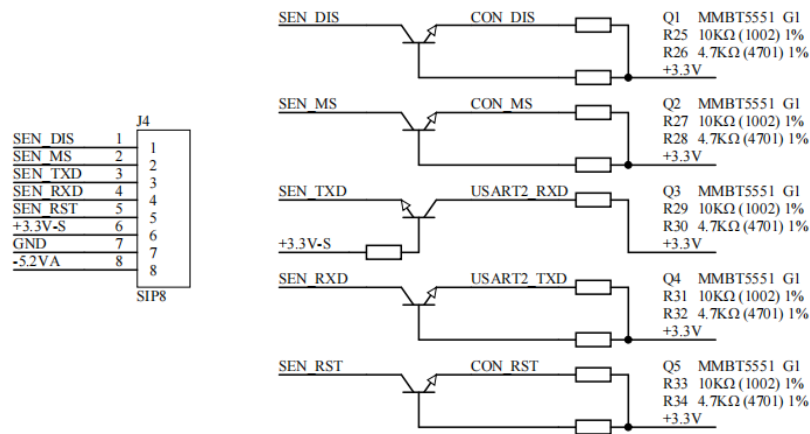


图 2.11 可调谐激光器串口电路原理图

### 2.2.1.4 探头温度适应性设计

在环境温度发生变化时，由于晶体的热光效应和热膨胀效应，介质的光学参数（如折射率、透过率等）和几何尺寸会发生变化，这会导致光电探头的干涉光谱不仅与被测电场有关，还将随着环境温度的变化而改变，从而产生交叉敏感。这也是光学类传感器普遍存在的一个关键问题。针对该问题，项目设计了一套工作波长反馈追踪系统，采用可调谐激光器实时扫描传感器输出的透射光谱，追踪传感器的工作点在不同环境温度下的变化，并通过反馈控制光源的输出波长值，从而减小温度漂移引起的测量误差。



最佳工作波长点（光传输系数为 50%的点即为最佳工作点）。其次，实时监测传感器的温度变化值，并根据当前温度值反馈调整激光器的工作波长，最终实现传感器工作点的实时追踪。

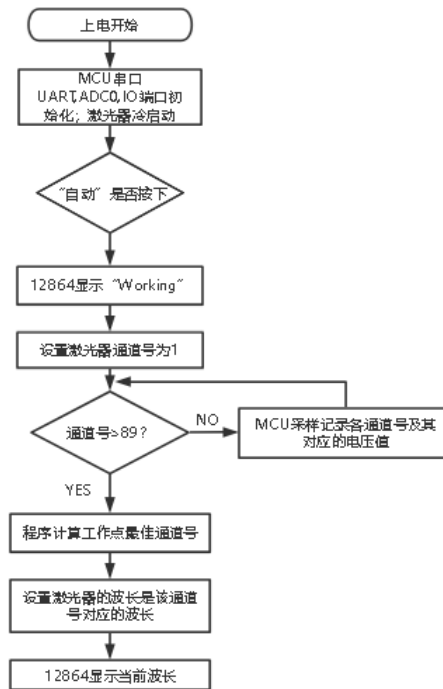


图 2.15 工作点控制软件流程图

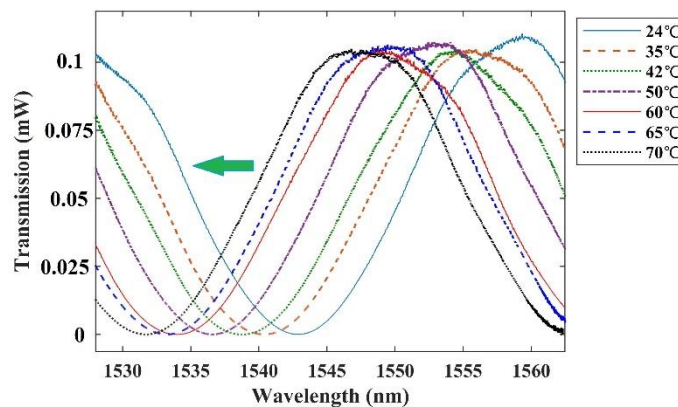


图 2.16 传感器输出光谱随温度变化情况

图 2.16 为不同环境温度下，传感器输出谐振光谱与环境温度之间的关系。从图中可以看出，温度从 24°C 增加至 70°C 时，传感器输出

谐振光谱的中心波长从 1543nm 减小至 1531nm，工作点温度敏感系数高达 260pm/°C。如图 2.17 所示，施加项目设计的工作点反馈控制系统后，工作点温度敏感系数降低至 8.7 pm/°C，降低了近 30 倍，该实验结果表明了项目提出的温度补偿方法的有效性。

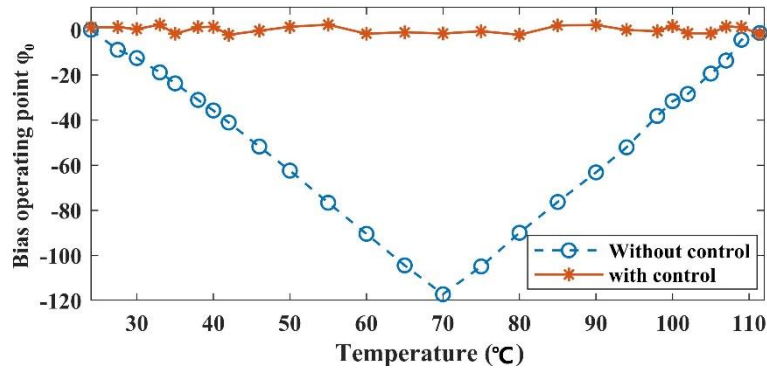


图 62.17 反馈控制系统对传感器的工作点影响

## 2.2.2 光接收模块硬件设计

选用 Thorlabs 公司的 RXM25AF 光电探测器为光接收模块，该模块的带宽范围为 25GHz，低频截止频率为 500kHz，响应时间为 50ps，满足项目指标要求。

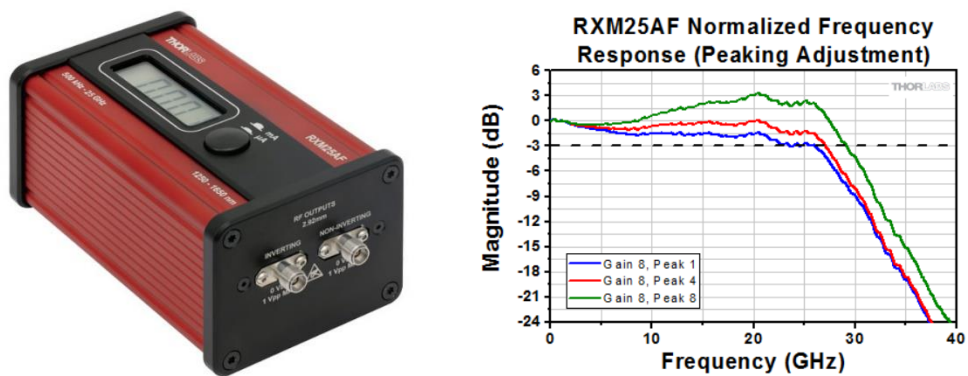


图 2.17 RXM25AF 光电探测器及其主要特性曲线

RXM25AF 光电探测器的电源要求为 5V/0.5A，电源部分电路设

计如图 2.18 所示，电源芯片型号 WRB1205S-3WR2。同时，该电路前端设计了储能、延时功能，在设备意外断电时，实现光电探测器的延时断电保护。

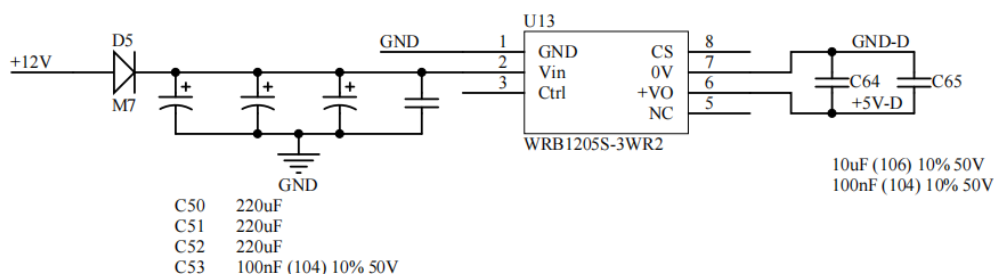


图 2.18 RXM25AF 的电源电路原理图

### 2.2.3 总控软件设计

所设计的总控制模块软件流程如下图所示。首先，打开总电源，系统初始化，完成控制模块、光电转换模块、温度采集模块和机箱风扇上电。其次，选择是否进行系统校准；最后，设置通道测量指令、选择单/多通道测量模式开始测量。

控制模块分发是否校准模式指令。若无需校准，测量主机自动获取当前探头温度信息，并自动设置光源工作波长和光功率，同时屏幕显示这些信息，测量就绪。测量过程中，若设置失败，可一键重置。进入校准模式后，控制模块分发扫描指令，进入激光器工作点的自动扫描模式，寻找最佳波长点，待校准完成，开始测量。

测量结束后，操作关闭光源，最后关闭总电源。

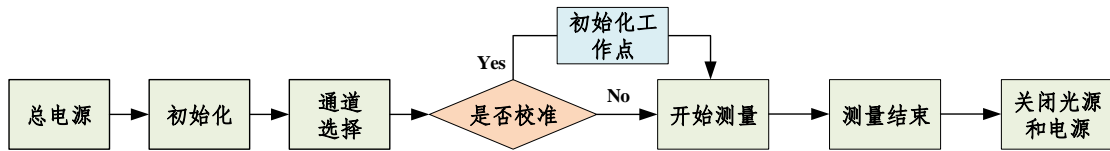


图 2.22 总控制模块软件流程



图 2.23 总控制模块开机界面、测量界面及工作点校准界面

## 2.2.4 电源供电设计

电源部分为测量主机中的光发射模块、接收模块和控制系统供电。测量主机 12V 直流电源, 激光器为+3.3V/1.5A 及-5.2V/1.2A 供电、光电探测器为+5V/0.5A、光电转换模块+5V/-5V,主控系统为 5V 及 3.3V。

## 2.2.4 主机机箱设计

机箱长宽高分别 20cm×20cm×9cm,采用全铝材质制造,为达到电磁屏蔽效果,机笼面板采用全封闭设计,可拆卸的板件接缝处接触面保持平整并使用电磁密封衬垫,固定螺丝间隔不大于 10mm。机箱操

作界面和三维图如图 2.24 和 2.25 所示。

光输入和输出接口为 FCAPC，采用日本原装进口光纤适配器法兰盘（品牌 SEIKOH GIKEN，日本精工），不锈钢材质，衰减几乎小于 0.1dB。射频接口为 SMA 高频转接器，工作频率 DC-18GHz，不锈钢材质。

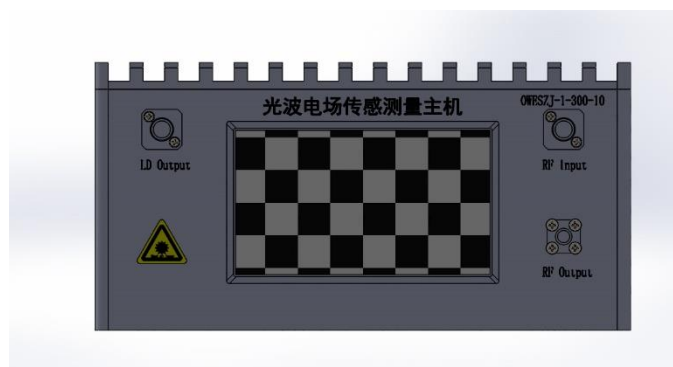


图 2.24 机箱正面设计图

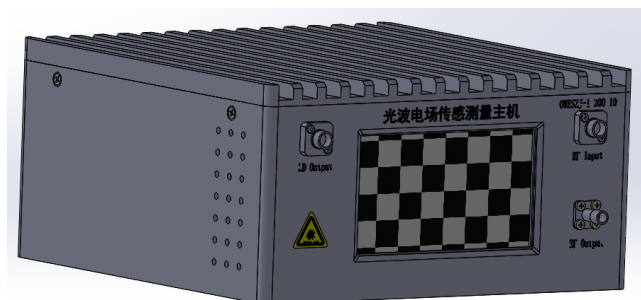


图 2.25 机箱三维图

### 2.2.5 主机系统性能

- 完备的电源供电方案

12V 直流供电，每个设备取用前，均设计隔离防护，屏蔽来自市电以及模块间的电源串扰。

- 完善的电磁兼容设计

机箱按照电磁兼容方案设计，接口处重点处理，设备所有对外接口均隔离后输出，设计时抑制干扰源产生的电磁干扰，高敏感设备单独防护提高抗电磁干扰的能力（降低对于扰的敏感度）。

- 友好的人机界面

采用触摸屏，作为系统与操作人员互动界面，界面设计友好，操作简便。

- 模块化设计

模块化设计可以减少各个模块之间的影响，便于布局和接线，可维护性、可靠性将会提高。

- 高可靠性

优选主流、推荐或经批量验证的物料、模块和方案。

## 2.3 配套软件设计方案及其功能

电磁脉冲电场测量系统上位机软件实现对场强测试结果显示、采集数据分析和存储等功能。

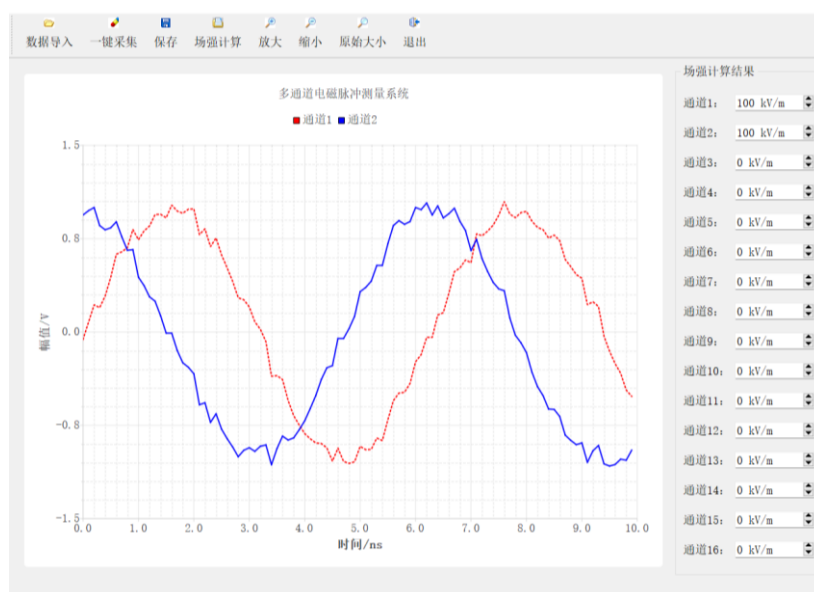


图 2.25 用户界面显示

用户界面显示示波器采集的数据波形，并通过该界面发出相应的命令消息实现相应的功能。图所示为用户界面，在该界面下用户可完成数据导入、一键采集、保存、场强计算结果显示等功能。

系统功能包括：

- (1) “一键采集”功能，实现对示波器进行一键采集，以日期为文件夹，保存、绘制所采集传感器响应波形。
- (2) “数据回看”功能，绘制所存储数据的波形。
- (3) “天线因子”功能，查看各个通道的天线因子。
- (4) “数据分析”功能，可以查看存储数据对应的微分脉冲的细节波形，以及分析方波脉冲的场强信息。
- (5) “放大显示”、“缩小显示”、“原始大小”功能，实现对所绘制的波形进行放大、缩小以及复位的功能。同时，鼠标的左右键、圈选也可以实现所绘制波形的放大与复位功能。
- (6) “保存界面”功能，实现对各功能菜单操作后的软件界面图形的保存。
- (7) “退出系统”功能，实现系统退出功能。

程序各个功能没有先后次序，点击相应的菜单即可实现对应的功能。



图 2.27 “一键采集”之波形显示以及场强分析结果界面

### 3. 典型应用及校准结果

#### 3.1.1 超宽谱脉冲信号测试

使用超宽谱脉冲发生器产生微分高斯脉冲, 脉冲上升时间 0.57ns, 下降时间 0.98ns, 峰值场强最高可达百 kV/m.



图 2.28 测试实物图

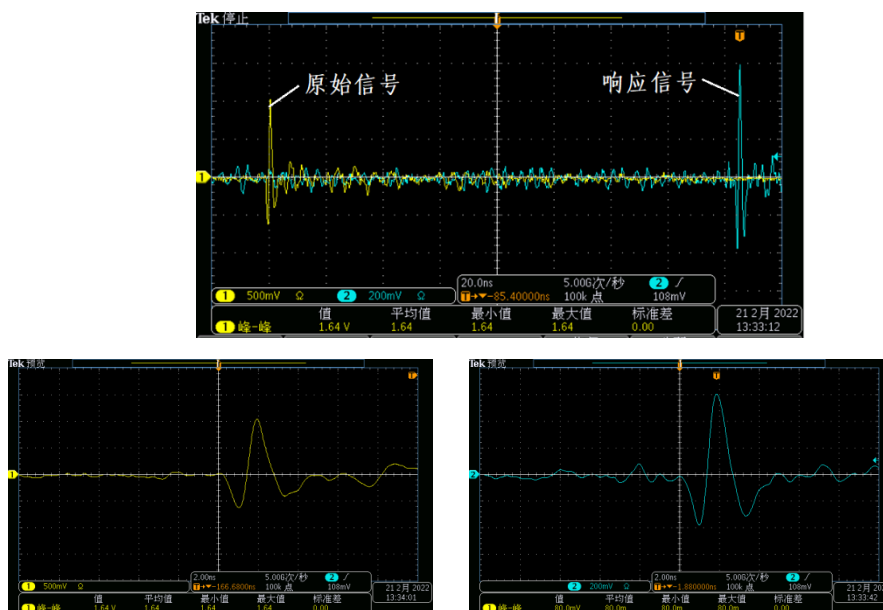


图 2.29 纳秒脉冲信号波形与传感器的响应波形

### 3.1.2 方波脉冲测试

使用方波脉冲发生器和 TEM2 产生标准方波脉冲电场, 脉冲宽度 200ns, 脉冲场强 1kV/m 至 300kV/m, 传感器的测量脉宽响应误差小于 0.15%

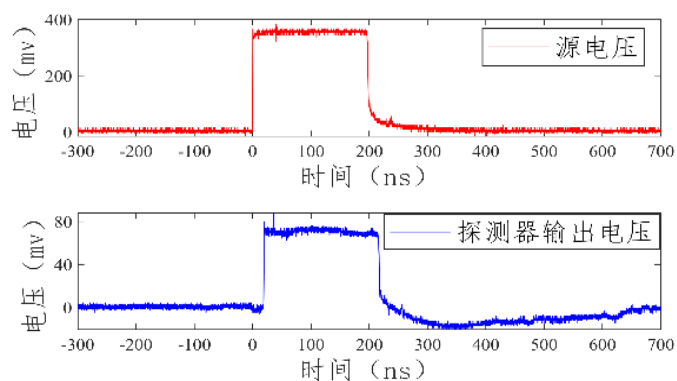


图 2.30 方波脉冲波形

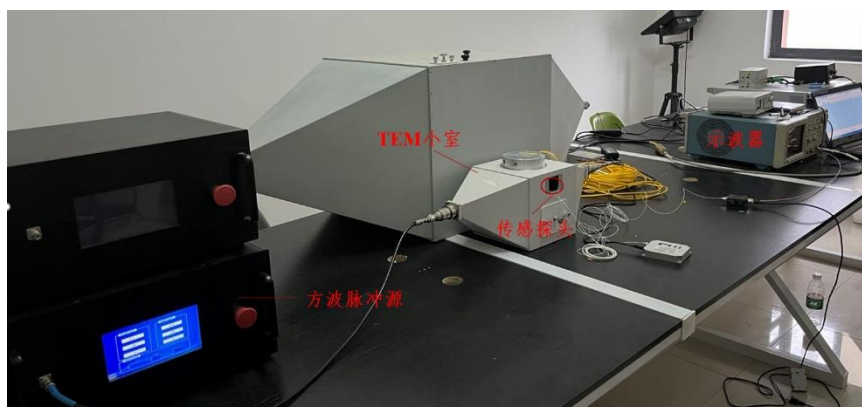


图 2.31 测试实物图

### 3.1.3 高功率微波测试

高功率微波测试在微波暗室内进行。测试电场强度为, 测试频率范围 100MHz~18GH。探头幅频特性测试结果如下。

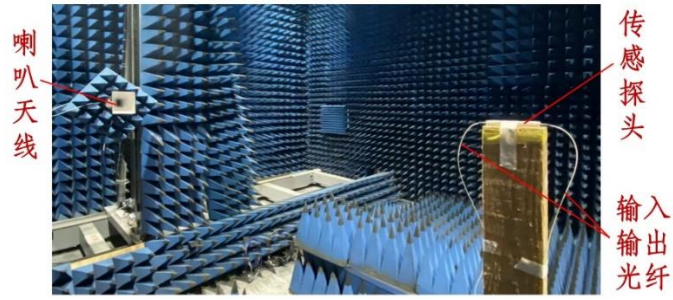
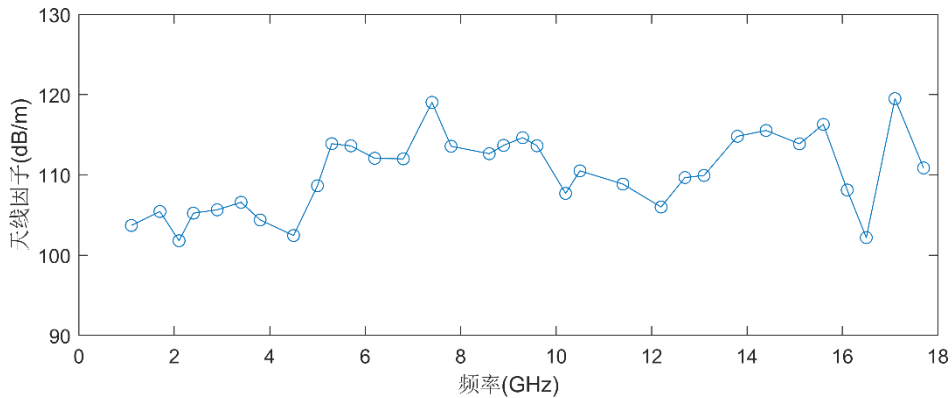


图 2.32 测试实物图

1-18GHz 频段

频率(GHz)	天线因子(dB/m)	频率(GHz)	天线因子(dB/m)
1.15 GHz	103.7	9.3 GHz	114.64
1.7 GHz	105.44	10.2	107.7
2.1 GHz	101.8	10.5	110.51
2.4 GHz	105.23	11.4	108.86
2.9 GHz	105.65	12.2	106
3.4 GHz	106.59	12.7	109.67
3.8 GHz	104.39	13.1	109.93
4.5 GHz	102.45	13.8	114.81
5 GHz	108.65	14.4	115.54
5.7 GHz	113.62	15.1	113.87
6.2 GHz	112.07	15.6	116.29
6.8 GHz	112	16.1	108.12
7.4 GHz	119.04	16.5	102.19
7.8 GHz	113.57	17.1	119.5
8.6 GHz	112.64	17.7	110.87
8.9 GHz	113.68	18	113.56



100kHz-1GHz 频段

频率(KHz)	天线因子(dB/m)	频率(GHz)	天线因子(dB/m)
100kHz	135.97	200MHz	109.09

300kHz	125.58	300MHz	109.87
500kHz	121.72	400MHz	110.94
5MHz	110.47	500MHz	108.40
15MHz	108.57	600MHz	108.84
30MHz	108.84	700MHz	111.02
50MHz	109.26	800 MHz	108.56
80MHz	108.74	900 MHz	110.61
100MHz	108.09	1GHz	109.61

