

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209607

用于爆炸辐射电磁脉冲时域测量的 集成光波导电场传感器研制*

张家洪¹, 王欣¹, 陈福深²

(1. 昆明理工大学信息工程与自动化学院 昆明 650500; 2. 北京森馥科技股份有限公司 北京 102209)

摘要:针对爆炸辐射电磁脉冲(EMP)上升沿快、脉宽窄、峰值场强高等特点,设计并研制出一种集成光波导宽带电场传感器。使用标准雷电电磁脉冲(LEMP)对研制的传感器进行时域标定得出,传感器能够不失真地测量出LEMP的时域波形,且最小和最大可测电场分别约为1.4和10.8 kV/m;使用连续波电场对传感器进行频域标定得出,传感器最小可测电场为52.5 mV/m,且在9 kHz~1 GHz响应波动在±4 dB以内。最后在国内某试验基地搭建了基于研制的光波导电场传感器的爆炸辐射EMP现场测试系统,分别对距爆炸点不同距离处的辐射EMP进行时域测量。结果表明,爆炸辐射EMP的产生滞后爆炸发生约几毫秒;辐射EMP为一系列双极性脉冲组成的脉冲串,单个脉冲宽度在100 μs以内,脉冲串宽度在2 ms以内,频率在17.5~35 kHz;在距离爆炸物5 m以内的爆炸辐射EMP峰值场强在5~10 kV/m。本文研制的光波导电场传感器具有全无源、宽带宽、对被测电场干扰小、体积小、强抗电磁干扰等特点,为爆炸辐射EMP的时域测量提供了一种新的技术手段。

关键词: 爆炸;电磁辐射;电磁脉冲;集成光波导;电场传感器

中图分类号: TN29 TH76 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

Research and development of an integrated optical waveguide sensor for measurement of the explosive radiation electromagnetic pulse

Zhang Jiahong¹, Wang Xin¹, Chen Fushen²

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Beijing Safety Test Technology Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: For measuring the explosive radiation electromagnetic pulse (EMP) with fast rise time, narrow pulse width and intense field strength, an integrated optical waveguide electric field sensor is designed and developed. The sensor detected waveform of the applied lightning EMP in the time domain shows almost without distortion in comparison with the original voltage waveform. The minimum and maximum measurable electric fields in time domain are 1.4 and 10.8 kV/m, and the minimum measurable electric fields in the frequency domain is 52.5 mV/m. The response fluctuation is within ±4 dB in the frequency range of 9 kHz to 1 GHz. Finally, the in-situ testing system of explosive EMP has been setup based on the developed optical waveguide electric field sensor. The radiation EMP at different distance from the explosion place has been measured in the time domain. Results show that the radiation EMP is generated after the explosion for about several milliseconds. The radiation EMP is a series of bipolar pulse train, the width of a single pulse is less than 100 μs, the width of the pulse train is less than 2 ms, and the frequency range is 17.5~35 kHz. The EMP field intensity within 5 m from the explosive is about 5~10 kV/m. The developed sensor has characteristics of full passive, wide bandwidth, negligible field interference, small volume, and good electromagnetic immunity, which provides a new technique for measurement of the explosive radiation EMP.

Keywords: explosion; electromagnetic radiation; electromagnetic pulse; integrated optical waveguide; electric field sensor

0 引言

炸药爆炸时会产生大量的等离子体和带电的轰爆产物,它们迅速碰撞,并向外产生较强的电磁脉冲(electromagnetic pulse, EMP)辐射^[1]。这种强电磁辐射容易对周围一定范围内的电子设备和系统(如无人机、引信装置、雷达通信系统、计算机控制系统等)产生电磁干扰,甚至可以穿透车辆、工程岩土等介质造成仪器失灵、系统失控等事故,造成不必要的损失^[2-3]。因此,深入研究爆炸电磁辐射产生的机理及电磁辐射信号的规律和特点,将对战场电子设备与系统的电磁兼容性设计产生重要意义。无疑对爆炸辐射 EMP 进行直接测量将是开展此项研究最直接有效的手段。

早在 1954 年,国外学者 Kolsky^[4]就发现了炸药爆炸会产生 EMP 的现象。随后, Boronin 等^[5]通过实验研究认为,固体炸药爆炸近区电磁场产生的机理与爆炸时空气电离层中电子的加速和减速过程有关。Van Lint^[6]和 Boronin 等^[7]先后通过实验测到了爆炸电磁辐射的波形,再次证明了化爆时确实会产生较强的电磁辐射。相比之下,国内在爆炸电磁辐射方面的研究起步较晚。1997 年,陈生玉等^[8]采用天线对带壳装 B 炸药的电磁辐射进行测量,并采用量纲分析方法,初步给出了电磁辐射与爆炸动力学参量之间的关系。2009 年,戴晴等^[9]利用宽带对数周期天线和脊形喇叭天线对铝、镁等混合物爆炸产生的宽带电磁辐射波形进行测量,得到信号的频率范围为 0.1~2 GHz,整个脉冲持续时间约为 200 ns。2011 年,曹景阳等^[10]采用杆天线和实时频谱仪对火箭分离时火工品爆炸引起的电磁辐射干扰进行测量研究,得出聚能炸药爆炸时产生的电磁辐射为 EMP 串,脉冲宽度在数十微秒以内,频率主要集中在 MHz 量级,单个频点上的电场峰值约从 100 mV/m~9 V/m。2014 年,王长利等^[11]基于 TEM 喇叭天线和杆天线构建测量系统,对梯黑铝、B 炸药和 PETN 爆炸时产生的电磁辐射特性进行实验研究,得出这几种典型炸药的爆炸电磁辐射信号频谱主要集中在 100 MHz 以内,且不同种类炸药爆炸产生的信号频谱不同。2020 年,任会兰等^[12]采用磁场线圈对 B 炸药爆炸辐射 EMP 进行测量,并采用小波分析方法对辐射信号进行分析,得出信号频谱主要分布在 0~50 kHz。陈鸿等^[13]采用宽带天线对 RDX 以及 RDX 基含铝炸药爆炸电磁辐射信号特性进行实验研究,得出辐射信号频率主要分布在 500 MHz 以内,并且不同含铝量炸药爆炸电磁辐射信号频谱不同。此外,自 2019~2021 年崔元博等^[14-16]设计采用一套基于超宽带无源全向天线和短波无源全向天线的电磁辐射测量装置,对爆炸电磁辐

射进行测量,并从时域和频域对测量到的信号进行了较为详细的分析,得出 TNT 爆炸产生的电磁辐射信号最强烈的时间段为爆炸后 80~110 ms,辐射信号主要集中在 100 MHz 以内,爆炸产生的电磁辐射强度范围主要在 64.33~348.25 V/m。

从现有研究结果可以看到,不管是铝、镁混合物炸药、聚能炸药、梯黑铝、B 炸药、PETN、RDX 或 RDX 基含铝炸药还是 TNT 爆炸等产生的电磁辐射主要为宽度 μs 级的 EMP 串,频谱包含从 DC 到 GHz,场强范围约从 1 mV/m~900 V/m 甚至到 kV/m 级。目前对爆炸电磁辐射的研究主要采用宽带天线作为实验测量手段。但是单个宽带天线很难实现如此大带宽和大动态范围的电磁辐射测量,因此实际测量中往往需要采用多个天线进行联合测量,由此给实际操作带来很大不便。另外,宽带天线本身具有较大的金属结构,对被测电场的干扰不可忽视,并且测量系统采用同轴电缆进行信号传输,在复杂电磁环境中容易遭受电磁耦合干扰,同时信号衰减大、不能实现远距离传输。

因此,注意到爆炸电磁辐射具有带宽宽(DC-GHz),动态范围大(mV/m~kV/m)等特点,同时被测电磁环境复杂,采用传统宽带天线测量存在对源电场干扰大、易受电磁干扰、测量系统操作困难等问题。本文基于光电子技术,研制一种小型化、全无源的宽带集成光波导电场传感器,并采用光纤进行信号传输,实现了宽带宽、大动态范围的电磁辐射测量,同时具有强抗电磁干扰的能力,适用于复杂电磁环境中的电磁辐射测量。

1 光波导电磁脉冲传感系统

集成光波导电场传感系统组成如图 1 所示,激光器输出中心波长为 1 550 nm 的线偏振光经保偏光纤(polarization maintaining fiber, PMF)传输到集成光波导电场传感器。光波导电场传感器采用集成光电子技术将非对称的马赫增德尔(Mach-Zehnder interferometer, MZI)光波导干涉仪、偶极子天线以及调制电极集成在一片砷酸锂(LiNbO₃, LN)晶片表面。当传感器天线接收到外部被测电场时,会在天线末端即调制电极之间产生感应电压,进一步利用 LN 晶体的光电效应,该感应电压在电极间形成的电场将致使晶体的折射率发生变化,从而使光波导传输光波的相位发生变化,即产生光相位调制。最后在传感器输出端利用 MZI 的干涉作用将光相位调制转化为光强度调制,并使用单模光纤(single mode fiber, SMF)将强度调制光信号传输到光电探测器(photo detector, PD)转化成电信号,即可从中获取被测电场的信息。

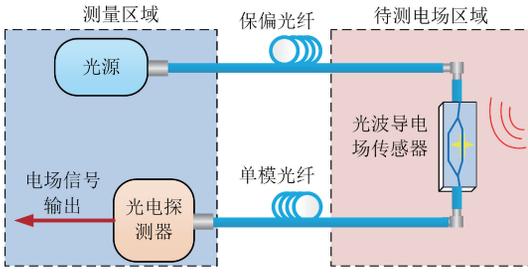


图1 集成光波导电场传感系统组成

Fig.1 Configuration of the integrated optical waveguide electric field sensing system

由于光波导传感器采用集成光学技术制备,具有体积小、全无源的特点,并且使用光纤进行信号传输,使得传感器对被测场的干扰几乎可以忽略不计,同时测量系统具有强抗电磁干扰的能力,可实现信号的远距离传输。理论上由于利用晶体的电光效应将被测电场信号调制到光载波上,而注意到电光效应发生的时间在 fs 量级,因此这种传感器理论上最高响应频率可达 THz 级。考虑到受 PD 频响的限制,系统目前最大带宽可达到 40 GHz。

1.1 传感器原理与设计

LN 晶体在 z 方向的电光系数 γ_{33} 最大,因此采用 x 切 y 传, z 方向加电场的 LN 晶体作为传感器的衬底,以获得最佳的调制效果^[17]。当存在沿 z 轴方向的电场 E_z 时,根据 LN 晶体的电光效应, LN 波导沿 z 方向的折射率变化可以表示为:

$$\Delta n = \frac{1}{2} n_{\text{eff}}^3 \gamma_{33} \Gamma E_z \quad (1)$$

式中: n_{eff} 为 LN 波导的有效折射率; γ_{33} 为 LN 晶体的电光系数; $\Gamma (< 1)$ 为调制电场与光波电场间的重叠因子。式(1)表明, LN 波导折射率的改变量与空间电场的大小线性相关,这是集成光波导电场传感器工作的基础。

本文设计的光波导电场传感器结构如图 2 所示。当光经保偏光纤从 MZI 干涉仪入射端入射时,将被 Y 型结构分支分为等强度的两束光,当天线接收到空间电场 $E(t)$ 时,会在电极间产生感应电压 $V(t) = h_{\text{eff}} E(t)$, h_{eff} 为天线的有效长度。根据 LN 晶体的电光效应,由该电压在电极间形成的电场将致使该臂波导传输的光波的折射率发生变化,从而在 MZI 出射端与另一臂中的光波形成相位差 $\varphi(E)$ 为:

$$\varphi(E) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L_{\text{el}} = \frac{\pi n_{\text{eff}}^3 \gamma_{33} L_{\text{el}} \Gamma h_{\text{eff}} E(t)}{\lambda G_{\text{el}}} \quad (2)$$

式中: L_{el} 为电极长度即电光相互作用长度; G_{el} 为电极间距。当光波相位 $\varphi(E) = \pi$ 时,可将传感器的半波电场 E_{π} 表示为:

$$E_{\pi} = \frac{\lambda G_{\text{el}}}{n_{\text{eff}}^3 \gamma_{33} L_{\text{el}} \Gamma h_{\text{eff}}} \quad (3)$$

根据集成 MZI 型电光调制器的基本理论,可进一步将传感器的输出光功率表示为:

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{2} \alpha P_{\text{in}} \left\{ 1 + k \cos \left[\frac{\pi}{E_{\pi}} E(t) + \Delta\varphi_0 \right] \right\} \quad (4)$$

式中: P_{in} 为输入传感器的光功率; α 和 k 分别为传感器损耗系数和消光系数; $\Delta\varphi_0$ 为传感器的静态工作点。

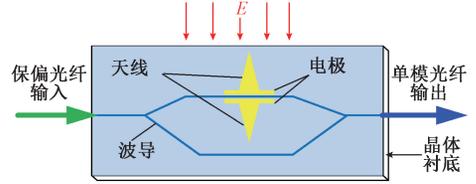


图2 集成光波导电场传感器结构

Fig.2 Schematic of the integrated optical waveguide sensor

当设计 E_{π} 满足 $\pi E(t)/E_{\pi} \ll 1$, 并且设计 MZI 两波导臂长度差为 $\lambda/2$ 使传感器的静态相位差 $\Delta\varphi_0 = \pi/2$ 时,式(4)简化为:

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{2} \alpha P_{\text{in}} \left\{ 1 - k \sin \left[\frac{\pi}{E_{\pi}} E(t) \right] \right\} \approx \frac{1}{2} \alpha P_{\text{in}} \left[1 - k \frac{\pi}{E_{\pi}} E(t) \right] \propto E(t) \quad (5)$$

从式(5)可以看到,被测电场 $E(t)$ 与传感器的输出光功率 P_{out} 成正比关系,即在输出端使用 PD 将传感器输出光信号转化为电信号,便可获得被测电场的信息。

设计传感器的天线长度为 2 mm,则在电小天线条件下天线的有效长度 $h_{\text{eff}} \approx 2$ mm,进一步设计电极长度 $L_{\text{el}} = 4$ mm,电极间距 $G_{\text{el}} = 20 \mu\text{m}$,则将波导有效折射率 $n_{\text{eff}} = 2.1$,电光重叠因子 $\Gamma = 0.4$,LN 晶体的电光系数 $\gamma_{33} = 30.8 \text{ V/pm}$ 代入式(3),计算得到传感器的半波电场 $E_{\pi} \approx 34.0 \text{ kV/m}$ 。当满足线性测量条件 $\pi E(t)/E_{\pi} \ll 1$ 时,可得传感器的线性最大可测电场约为 $E_{\pi}/\pi \approx 10.8 \text{ kV/m}$ 。因此,可以通过设计不同的天线结构尺寸改变传感器的灵敏度。最后采用光刻、质子交换、磁控溅射等微光学的制作工艺技术研制出集成光波导电场传感器如图 3 所示。可以看到,传感器的体积为 $75 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,这与目前采用的宽带天线相比,传感器的体积得到极大地减小,由此有效地提高了电场测量的空间分辨率。

1.2 传感器标定

1) 时域标定

考虑到爆炸辐射 EMP 的宽度在微秒量级,本文搭建如图 4 所示的实验系统,产生微秒级雷电 EMP 场对研制的传感器进行时域标定。

由图 4 可知,使用高压脉冲发生器(LSG-506CB)产生上升沿 $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$,脉宽 $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ 的标准雷电电磁脉冲(lightning electromagnetic pulse, LEMP)。根据国



图3 集成光波导传感器实物照片

Fig. 3 Photograph of the packaged sensor

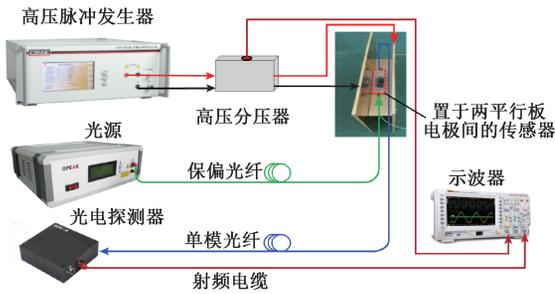


图4 传感器时域电磁脉冲标定系统

Fig. 4 Calibration system of the sensor in the time domain for measuring the EMP

标 GB/T 12720-1991,为了在两块平行金属极板间产生均匀电场,平行极板间距 d 应不小于 1.5 倍探头的侧面尺寸,同时探头的边缘距离地板的任一边缘不小 $2d$ 。因此,设计两块面积为 $35\text{ cm} \times 35\text{ cm}$,间距为 25 cm 的铜板构成平行平板电极,并将高压脉冲发生器输出电压 U 接到两平行板电极上,从而在平行平板电极间产生峰值场强为 $4U$ 的匀强电场。研制的光波导电场传感器置于两平行极板之间,其输入端和输出端分别通过长度 20 m 的 PMF 和 SMF 与激光器和带宽 PD 相连接。激光器输出中心波长 1550 nm ,功率 13 dBm 的线偏振光。宽带 PD 带宽 $DC-200\text{ MHz}$,用于将传感器输出光信号转换为电信号。模拟带宽 200 MHz ,采样率 4 GS/s 的示波器 (MSO4024) 通过射频 (radio frequency, RF) 电缆与 PD 相连接,用于提取 PD 输出电信号即电场信号。同时,高压脉冲发生器输出高压脉冲信号通过高压分压器分压后输入示波器另一个通道,与传感器探测到的电场信号进行对比分析。传感器测量到的脉冲电场时域波形如图 5 所示。

图 5 为传感器测量到的脉冲电场波形和高压脉冲发生器输出的脉冲电压波形示意图。从图 5 局部放大图可以得出,传感器探测到的电场波形的上升时间和脉冲宽度分别为 1.0 和 $45\text{ }\mu\text{s}$,脉冲电压波形的上升时间和脉冲宽度分别为 0.8 和 $45\text{ }\mu\text{s}$,可见研制传感器能够很好地探测到 EMP 的时域波形。进一步改变高压脉冲发生器的输出电压从 500 V 变化到 2100 V ,即在两平行板电极间

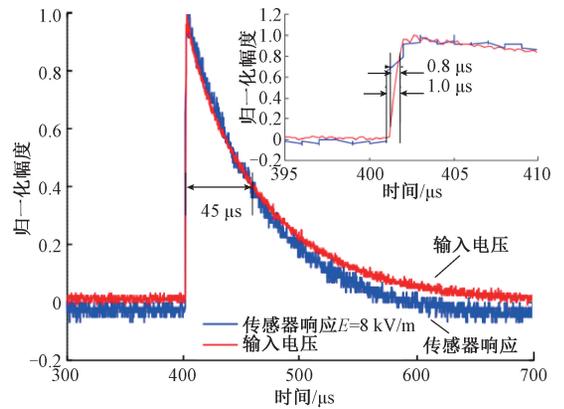


图5 传感器时域响应波形

Fig. 5 Sensor response in the time domain

产生峰值从 2 kV/m 变化到 8.4 kV/m 的脉冲电场,得出传感器系统输出信号幅度与外加电场之间的关系如图 6 所示。通过线性拟合得到拟合直线 $y = 454.335 + 95.565x$ 的线性相关系数为 0.9921 。注意到系统噪声约为 5 mV ,由此根据拟合曲线可得当输出信号信噪比不小于 6 dB 时,系统时域最小可测电场约为 1.4 kV/m 。

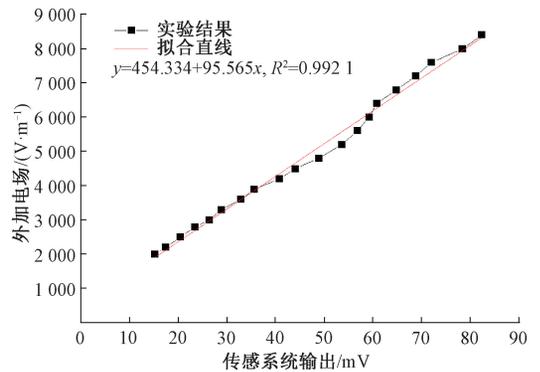


图6 传感器时域输入输出特性

Fig. 6 Input output characteristics of the sensor

2) 频域标定

如图 7 所示,微波信号源输出信号经过功率放大后通过宽带天线在微波暗室中辐射出垂直极化波。将研制的光波导电场传感器放置在天线正前方用于接收该电磁辐射信号,同时在靠近传感器的位置放置标准光电场强探头用于监测该辐射电磁波的场强。光波导电场传感器的输入和输出端分别使用 PMF 和 SMF 与激光器和 PD 相连,标准场强探头输入和输出端使用 SMF 与场强仪主机相连。改变微波信号源输出信号的频率从 9 kHz 变化到 1 GHz ,同时通过调整微波源的输出功率,确保标准场强探头监测到的不同频率的电磁辐射信号的场强为 10.5 V/m ,测试得出传感器的频率响应曲线如图 8(a) 所

示,可以得出,传感器在 9 kHz~1 GHz 频率范围内响应波动在±4 dB 以内。

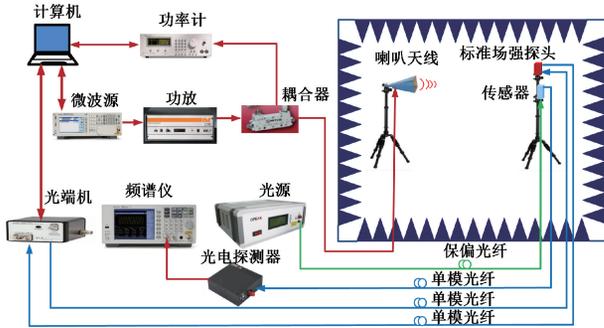
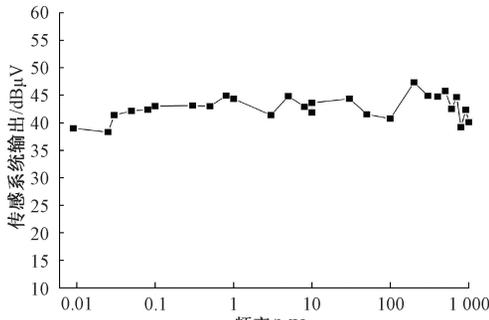
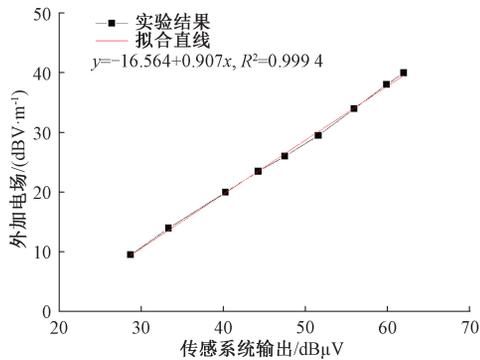


图 7 传感器频域测量系统

Fig. 7 Frequency measurement system of sensor



(a) 频率响应
(a) Frequency response curve



(b) 输入输出特性
(b) Input/output characteristic curve

图 8 传感器频域响应特性

Fig. 8 Frequency response of the sensor system

进一步保证微波信号源输出信号频率为 1 GHz,控制改变其输出功率,使标准场强探头监测到的电磁辐射信号场强从 2.98 V/m 变化到 100 V/m,得出传感器的频域输入输出特性曲线如图 8(b) 所示。通过线性拟合得到拟合直线 $y = 16.564 + 0.907x$ 的线性相关系数为 0.999 4,从而传感器具有较好的线性特性。此外,考虑到频域测试过程中可通过设置频谱仪的分辨率带宽 (resolution bandwidth, RBW) 为 100 Hz 将传感系统的噪

声压缩到约为 -120 dBm,由此可得当信噪比为 3 dB 时,传感器能够探测到的最小电场约为 52.5 mV/m。

2 爆炸辐射场现场测试

在国内某开阔试验基地布置测试系统如图 9 所示,采用研制的集成光波导电场传感器对爆炸辐射 EMP 进行时域测量。将当量为 200 g 的含能爆炸材料置于密封罐中,并悬空固定在两根支架上,使其与地面的垂直高度为 H 。通过起爆器的充放电远程控制含能爆炸材料的起爆。传感器与爆炸物的水平距离为 D ,传感器的输入和输出端分别通过 200 m 的 PMF 和 SMF 与激光器和 PD 相连接。PD 输出电信号通过 RF 电缆输入模拟带宽 200 MHz 的 RIGOL 示波器,同时将起爆器输出触发信号输入示波器作为触发电源,通过示波器的触发功能提取传感系统测量到的爆炸辐射 EMP 信号。现场实验人员以及起爆器、激光器、PD、等仪器设备均在 200 m 外的安全房内,以确保测试人员和设备的安全。

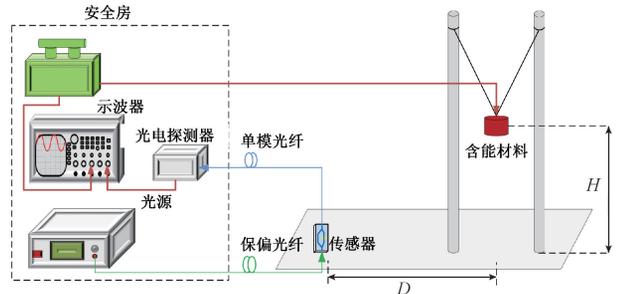


图 9 爆炸辐射 EMP 测量系统

Fig. 9 The explosive radiation EMP measurement system

当爆炸物距地面垂直高度为 1.2 和 0 m,传感器距离爆炸物的水平距离 D 分别为 5、4、3 m 时,通过示波器提取到传感器探测到的爆炸辐射 EMP 的时域波形如图 10 与表 1 所示。从图 10 中可以看到,4 次测试中有 3 次探测到的爆炸辐射 EMP 波形滞后触发电信号 5~6 ms。注意到辐射 EMP 信号加载到光载波上的时间即发生电光效应的时间在 fs 量级,光信号在光纤中传输 200 m 的时间约为 97 μ s,光信号转换为电信号的时间即 PD 的响应时间在 ns 量级,因此可以认为测量系统测量到辐射 EMP 信号的时间几乎可以忽略不计,即可以认为爆炸辐射 EMP 信号的产生滞后爆炸发生约几毫秒。爆炸电磁辐射信号为一系列双向脉冲组成的脉冲信号串,并且一次爆炸可能产生两个或多个脉冲信号串。进一步将脉冲信号串局部放大后可以得出,单脉冲宽度在 100 μ s 以内,脉冲串宽度在 2 ms 以内。图 10(a)~(d) 中不同垂直高度和水平距离时,爆炸辐射电磁辐射脉冲的上升沿 t_r 分别为 0.02、0.02、0.01 和 0.02 ms,进一步根据电磁脉冲

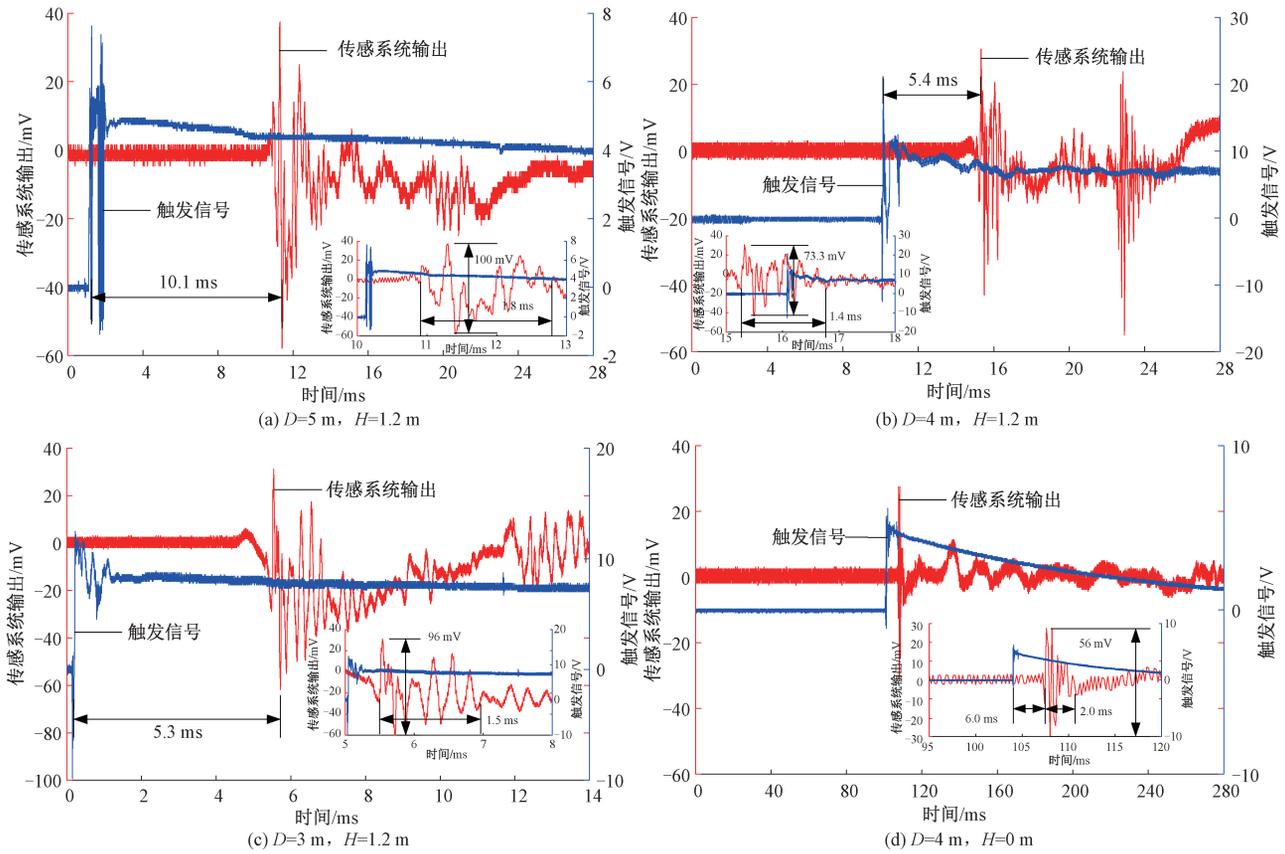


图 10 爆炸辐射 EMP 时域波形测量结果

Fig. 10 Time domain waveform measurement results of explosive radiated EMP

表 1 各测试点实验数据

Table 1 Experimental data of each test point

测试点	爆炸物	测试距	滞后时	峰值电	脉冲上	脉冲串
	高度/m	离/m	间/ms	压/mV	升沿/ms	宽度/ms
a	1.2	5	10.1	100	0.02	1.8
b	1.2	4	5.4	73.3	0.02	1.4
c	1.2	3	5.3	96	0.01	1.5
d	0	4	6	56	0.02	2

上限频率估算经验公式 $f_t \approx 0.35/t_r$ ，计算得出爆炸辐射电磁脉冲的频率在 17.5~35 kHz。

根据图 10 还可以得出，当爆炸物距地高度 $H = 1.2\text{ m}$ ，传感器距离爆炸物水平距离 D 分别为 5、4、3 m 时，光波导电场测量系统探测到的信号幅度分别为 100、73.3、96 mV，当 $H = 0\text{ m}$ ， $D = 4\text{ m}$ 时，测量系统探测到的信号幅度为 56 mV，将上述电压值代入传感器时域标定曲线 $y = 454.335 + 95.565x$ ，可得对应的电场强度分别为 10.011、6.551、9.629 和 5.806 kV/m。可以得出，本次爆炸辐射 EMP 场强大约在 10 kV/m。比较图 10(a)~(c) 可以看到，当爆炸物高度 H 一定时，传

感器探测到的辐射场强与传感器到爆炸物的水平距离 D 没有直接关系，而由图 10(b) 和 (d) 可知，当 D 一定， $H = 1.2\text{ m}$ 时的辐射 EMP 场大于和 $H = 0\text{ m}$ 时的场强。分析产生此种结果的原因主要是高度一定时，3 次测试水平距离差别不大，而每次爆炸本身发生的物理化学过程也存在差异。但当水平距离一定时，高度为 1.2 m 相比 0 m 更有利于使周围空气发生电离产生等离子体，因此场强更大。将本文研制的集成光波导电场传感器与现有的爆炸 EMP 测量技术做对比结果如表 2 所示。

从表 2 可看出，当爆炸物材料相同时，爆炸辐射 EMP 与测试距离相关，距离越近，辐射场强度越大，脉冲宽度越窄，频率越高；当爆炸物材料不同时，测试距离不再是影响爆炸辐射 EMP 的主要因素，而爆炸物材料、当量才是影响 EMP 强度、脉冲宽度与频率的决定因素；本文使用的集成光波导电场传感器利用无源特性可实现爆炸辐射 EMP 更近距离测量，测得辐射电场强度高达 kV/m，远超其他测量技术。总的来看，不管 B 炸药、某型弹、TNT 或含能炸药等爆炸等产生的辐射 EMP 场强范围从 V/m 量级到 kV/m 量级，频率约从 kHz 到 100 MHz。本文研

表2 爆炸辐射脉冲电场测试技术对比

Table 2 Comparison of blast radiation pulse electric field testing techniques

测试技术	材料	爆炸物当量	测试距离/m	辐射场强度/($V \cdot m^{-1}$)	脉冲宽度	脉冲频率
杆天线 ^[11]	B炸药	76.8 g	5	1.33	0.5 μs	70~90 MHz
磁场测量线圈 ^[12]	B炸药	4.5 kg	14.4	0.06	19 μs	50 kHz
宽频天线 ^[14]	某型弹	未知	60	300	20 ms	11~17 MHz
无源全向天线 ^[16]	TNT	60 kg	20	348.25	20 ms	20 MHz
本文	含能炸药	200 g	3	9 600	2 ms	35 kHz

制的集成光波导电场传感器频率测量范围可覆盖在 kHz~GHz,场强测量范围可从几十毫伏每米至几十千伏每米,因此这为爆炸辐射电磁脉冲时域测量提供了一种新的、有效的技术手段。

3 结 论

本文研制了一种集成光波导电场传感器,并使用上升时间 1.2 μs ,脉冲宽度 50 μs 的标准 LEMP 对传感器的时域响应特性进行标定。最后在国内某开阔试验基地,搭建爆炸辐射 EMP 现场测试系统,利用研制的光波导传感器对距爆炸点不同距离处的辐射 EMP 进行时域测量。结果表明,辐射 EMP 滞后爆炸发生约几毫秒;辐射 EMP 为一系列双极性脉冲组成的脉冲串,脉冲波形没有明显规律,单个脉冲宽度在 100 μs 以内,脉冲串宽度在 2 ms 以内,频率在 17.5~35 kHz 内;测量到距离爆炸物 5 m 以内的爆炸辐射 EMP 场强大约在 5~10 kV/m。本文研制的光波导电场传感器具有全无源、宽带宽、对被测电场干扰小、体积小、强抗电磁干扰等特性,为爆炸辐射 EMP、核电磁脉冲、高功率微波等的测量提供了一种新的技术手段。但是,由于实验条件的限制,暂时无法对不同距离测量点,不同爆炸物当量、材料等情况下的辐射 EMP 场进行现场测试,获取大量的实验数据。因此,爆炸辐射 EMP 强度与辐射距离、爆炸物当量之间的关系还有待未来进一步深入研究。

参考文献

[1] 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 孙承伟,译. 北京:科学出版社,2011: 1080-115.
 ОРЛЕНКО. Explosion physics [M]. SUN CH W, translated. Beijing: Science Press, 2011: 1080-1115.

[2] 张耀辉,何为,李跃波,等. 用于地面核爆源区电磁脉冲环境评估的工程等效电导率测量和反演方法[J]. 兵工学报, 2021, 42(7): 1544-1552.
 ZHANG Y H, HE W, LI Y B, et al. Engineering equivalent conductivity measurement and inversion method for field environmental assessment of

SREMP[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42 (7): 1544-1552.

- [3] 刘文思,陆越,周庆飞,等. 鱼雷近场爆炸复杂载荷及对舰船毁伤模式[J]. 兵工学报, 2021, 42(4): 842-850.
 LIU W S, LU Y, ZHOU Q F, et al. Complex load of torpedo near-field explosion and its damage mode to ships[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(4): 842-850.
- [4] KOLSKY H. Electromagnetic waves emitted on detonation of explosives[J]. Nature, 1954, 173(4393): 77.
- [5] BORONIN A P, VEL' MIN V A, MEDVEDEV Y A, et al. Experimental study of the electromagnetic field in the near zone of explosions produced by solid explosives [J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1968, 9(6): 712-717.
- [6] VAN LINT V A J. Electromagnetic emission from chemical explosions[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1982, 29(6): 1843-1849.
- [7] BORONIN A P, KAPINOS V N, KRENEV S A. Physical mechanism of electromagnetic field generation with explosion of condensed explosive charges. Results of experimental studies [J]. Combustion, Explosive and Shock Waves, 1990, 26(5): 603-609.
- [8] 陈生玉,孙新利,钱世平,等. 化爆引起的电磁辐射[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(4): 363-368.
 CHEN SH Y, SUN X L, QIAN SH P, et al. Electromagnetic radiation caused by chemical explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(4): 363-368.
- [9] 戴晴,李传胪,陈国强,等. 低温等离子体激励宽带电磁波信号的实验研究[J]. 电子信息对抗技术, 2009, 24(5): 72-74.
 DAI Q, LI CH L, CHEN G Q, et al. Experimental study of wideband electromagnetic radiation from plasma cloud[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2009, 24 (5): 72-74.

- [10] 曹景阳, 谢树果, 苏东林, 等. 航天火工品爆炸引起的电磁辐射干扰测量[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(11): 1384-1387.
CAO J Y, XIE SH G, SU D L, et al. Electromagnetic interference caused by aerospace explosives [J]. Journal of Beihang University, 2011, 37(11): 1384-1387.
- [11] 王长利, 李迅, 刘晓新, 等. 典型炸药爆炸过程的电磁辐射实验研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(S2): 188-192.
WANG CH L, LI X, LIU X X, et al. The experimental research on the electromagnetic radiation aroused by detonation of explosive[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(S2): 188-192.
- [12] 任会兰, 储著鑫, 栗建桥, 等. B炸药爆炸过程中电磁辐射研究[J]. 力学学报, 2020, 52(4): 1199-1210.
REN H L, CHU ZH X, LI J Q, et al. Research on electromagnetic radiation during the explosion progress of composition B explosives [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(4): 1199-1210.
- [13] 陈鸿, 何勇, 潘绪超, 等. RDX 基含铝炸药爆炸电磁辐射信号特性实验研究[J]. 含能材料, 2020, 28(5): 475-482.
CHEN H, HE Y, PAN X CH, et al. Experimental study on characteristics of explosive electromagnetic radiation signals of RDX based aluminized explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2020, 28(5): 475-482.
- [14] 崔元博, 商飞, 孔德仁, 等. 爆炸场电磁辐射特性测试技术研究[J]. 火工品, 2019(5): 1-5.
CUI Y B, SHANG F, KONG D R, et al. Research on testing technology of electromagnetic radiation characteristics in explosive field [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2019(5): 1-5.
- [15] 崔元博, 商飞, 孔德仁. 云爆弹爆炸电磁辐射测试技术研究[J]. 测试技术学报, 2020, 34(2): 99-103.
CUI Y B, SHANG F, KONG D R. Experimental study on electromagnetic radiation test of cloud explosion bomb[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2020, 34(2): 99-103.
- [16] 崔元博, 孔德仁, 张学辉, 等. TNT 爆炸电磁辐射信号测量及分析[J]. 含能材料, 2021, 29(3): 241-250.
CUI Y B, KONG D R, ZHANG X H, et al. Measurement and analysis of electromagnetic radiation signals of TNT explosives [J]. Chinese Journal of

Energetic Materials, 2021, 29(3): 241-250.

- [17] 陈福深. 集成电光调制理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
CEHN F SH. Integrated electro-optical modulation theory and technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.

作者简介



E-mail: zjh_mit@163.com

Zhang Jiahong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Yunnan Normal University in 2010, and Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2016. He is currently an associate professor at Kunming University of Science and Technology. His main research interests include the integrated optical waveguide electromagnetic field sensor and microwave photonic technology.



Wang Xin received his B. Sc. degree from Dalian Ocean University in 2018, and M. Sc. degree from Kunming University of Science and Technology in 2022. His main research interests include electric field sensing technology.



Chen Fushen received his B. Sc. degree from Chengdu Telecommunication Engineering College in 1968 and 1981, respectively. From 1988 to 1990, he worked at University College London on high speed integrated electro-optical modulators. In 1997, he was promoted to a professor. In 2001, he became a Ph. D. advisor in optical engineering. His main research directions are optical fiber communication, optical waveguide theory, optoelectronics and integrated optics.

Chen Fushen received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Chengdu Telecommunication Engineering College in 1968 and 1981, respectively. From 1988 to 1990, he worked at University College London on high speed integrated electro-optical modulators. In 1997, he was promoted to a professor. In 2001, he became a Ph. D. advisor in optical engineering. His main research directions are optical fiber communication, optical waveguide theory, optoelectronics and integrated optics.

张家洪 (通信作者), 2010 年于云南师范大学获得学士学位, 2016 年于电子科技大学获得博士学位, 现为昆明理工大学副教授, 主要研究方向为集成光波导电磁场传感器、微波光子技术等。

王欣, 2018 年于大连海洋大学获得学士学位, 2022 年于昆明理工大学获得硕士学位, 主要研究方向为电场传感技术。

E-mail: xiangyuanzai@163.com

陈福深, 1968 年于成都电讯工程学院获得学士学位, 1981 年于成都电讯工程学院获得硕士学位, 1988 至 1990 年在英国伦敦大学从事高速集成电光调制器的研究工作。1997 年晋升为教授, 2001 年成为光学工程专业博导。主要研究方向为光纤通信、光波导理论、光电子学和集成光学。

E-mail: fschen@ uestc. edu. cn