

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306206

kV/MHz 高重频可重构脉冲产生技术研究

王殿喜 蒋廷勇 张金灏 张守龙 成真伯

(西北核技术研究所 西安 710024)

摘要:针对当前超快脉冲和超高重频脉冲产生技术需求,基于固态半导体开关技术和脉冲合成技术,提出了一种基于延时触发控制的高重频可重构脉冲产生方法,研制了 kV/MHz 高重频可重构脉冲源原理型装置。测试结果表明,该脉冲源能够稳定输出幅度为 1 kV、重复频率 1 MHz、前沿时间约 700 ps 的亚纳秒脉冲,通过精确调节各脉冲触发时间顺序还可灵活改变脉冲前沿、脉宽和波形等参数,并能实现 1~50 MHz 重复频率的参数调节,可有效满足电子对抗、超宽带探测及通信等行业领域的应用需求。

关键词:高重频;亚纳秒脉冲;参数可调;功率合成;高精度延时

中图分类号: TM832 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510. 1010

Research on kV/MHz reconfigurable pulse generation technology

Wang Dianxi Jiang Tingyong Zhang Jinhao Zhang Shoulong Cheng Zhenbo

(Northeast Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: In order to meet the requirement of ultra-high repetition frequency pulse generation in current ultra-fast pulse generation technology, this paper proposes a high repetition frequency reconfigurable pulse generation method based on solid state semiconductor switching technology, pulse power synthesis technology and picosecond high precision delay trigger control technology, and develops a prototype device of high repetition frequency reconfigurable pulse generator with kV/MHz. The test results show that the pulse generator can stably output sub-nanosecond pulses with amplitude 1 kV, repetition frequency 1 MHz, rise time 700 ps. By precisely adjusting the trigger time sequence of each pulse, the rise time, pulse width and waveform can be flexibly changed, and the repetition frequency can be adjusted from 1 MHz to 50 MHz. It can effectively meet the application requirements of electronic countermeasures, ultra-wideband detection and communication industries.

Keywords:high repetition; sub-nanosecond pulse; parameter adjustable; power synthesis; high-precision delay

0 引言

高重频脉冲在高平均功率准分子激光、感应式回旋加速器、超宽带通信、电子对抗和反无人机等技术领域具有广阔应用前景^[1]。与常规脉冲产生中突出脉冲幅度指标的需求相比,脉冲波形质量和重复频率等技术指标在上述应用中起着越来越重要的作用,尤其是脉冲重复频率,是决定系统/装置的工作速率和效果关键因素之一^[2]。在上述需求牵引下,固态高重复频率脉冲产生技术已经成为当前重要发展方向,国内外在此领域进行了大量研

究工作。

产生高重复频率脉冲的核心关键在于开关,气体开关、水银开关和薄膜开关等类型传统开关具备较大功率容量,通常用于数十 kV~MV 级高压脉冲产生,但受开关恢复时间等限制其最高重复频率在数百 Hz 以下^[3],基于半导体固态开关的脉冲产生技术是当前兼顾 kV/MHz 两个关键指标的主要手段。

从当前国内外技术调研情况来看,常用且具备实现 kV/MHz 指标的半导体开关包括金属氧化物半导体场效应管(MOSFET)、绝缘栅型双极晶体管(IGBT)、快速离子化开关(FID)和漂移阶跃恢复二极管(DSRD)等。雪

崩三级管具备输出 kV 级脉冲产生能力,但受雪崩管载流子恢复时间限制其最高重复频率多在 100 kHz 以下,具备 MHz 脉冲重复频率雪崩三极管目前未在公开文献中提及。基于 GaAs、SiC 等光导半导体器件的脉冲产生技术近年来越来越受到越来越多国内外研究关注,该类开关具备高重频频率和高功率输出能力,但从目前研究来看,该半导体开关寿命相对较低,且要求激光器输出光束能量较高,暂时不适合作为高重频脉冲源开关。对于 MOSFET 和 IGBT 两类固态开关而言,尽管其输出脉冲幅度能够达到 kV 级,但脉冲前沿时间最快在数 ns~数十 ns^[3],导致末端天线辐射效率很低,很难作为脉冲源激励超宽带天线辐射,难以满足当前电子对抗、超宽带通信等对纳秒~皮秒脉冲产生要求。FID 和 DSRD 两类开关是目前能够兼顾 kV 级幅度和 MHz 重复频率的脉冲产生主要方案,两类开关均由俄罗斯圣彼得堡约飞研究所最先研制并应用,德国贝尔巴克 (Burbach, Germany) FID GmbH Technology 公司是目前世界上全固态高功率高重频电磁脉冲源研发和生产技术水平最高的公司,该公司核心技术即来源于约飞研究所,其超高重频脉冲源多采用了 FID 和 DSRD 两种等离子体波半导体开关器件,该类脉冲采购价格昂贵且周期很长,当前国际形势下随时可能面临禁运风险。目前国内中电科技集团 13 所、西安电子科技大学和西安交通大学等单位均重点针对 DSRD 器件开展了相关技术研究工作^[4],在芯片工作机理、理论和工艺等方面取得系列成果。具体到基于该类开关高重频脉冲源研制方面,国内西安交大黄寅等^[5]采用 DSRD 器件研制了输出电压峰值 1 kV,前沿时间 1.8 ns、脉冲宽度 8.3 ns 且重复频率达到 3 MHz 的脉冲源;中物院石小燕等^[1]研制了电压幅度 1 kV,脉宽小于 0.5 ns 且重复频率达到 800 kHz 亚纳秒脉冲发生器;国际上,约飞物理研究所 Grekhov 采用 FID 器件研制了脉冲幅度达 10 kV、前沿时间 80 ps 且重复频率达到 100 kHz 的固态脉冲源^[6];Merensky 等^[7]则基于 DSRD 器件研制了幅度达到 2.2 kV 且重复频率达到 1 MHz 的固态脉冲源。综合现有研究来看,能够兼顾脉冲源峰值电压达 kV 以上、重复频率达 MHz 且前沿或脉宽达亚 ns 量级的产生技术仍然是当前国内外脉冲发生器研究的难点和热点所在。鉴于 kV/MHz 超高重频纳秒脉冲产生技术在多个应用领域的潜在优势,开展相关研究工作以突破外界技术封锁,实现 kV/MHz 级纳秒脉冲产生关键技术国产自主化具有重要意义。

本文在脉冲合成理论基础上,提出了一种高重频可重构脉冲产生新方法,构建了原型装置并测试验证了 kV/MHz 脉冲产生技术可行性,具体工作包括:1)提出了基于多脉冲合成的 kV/MHz 高重频可重构脉冲产生方法;2)研究突破了包括百 V/MHz 脉冲产生单元、高精度

脉冲延时触发系统和高带宽脉冲合成网络等关键技术;3)研制了 kV/MHz 高重频可重构脉冲产生原型装置,实验测试了脉冲源装置在 3 种输出模式下性能参数,实现了不同功能需求下脉冲源产生结构的灵活柔性配置,验证了脉冲可重构技术的可行性,为后续 kV/MHz 脉冲在电子对抗、超宽带通信、探测以及其他领域的深化应用奠定坚实基础。

1 kV/MHz 高重频可重构脉冲产生原理

受限于单个固态开关工作电压和功率的限制,采用脉冲合成是实现 kV/MHz 高重频可重构脉冲的可行方法^[8],其基本原理如图 1 所示。

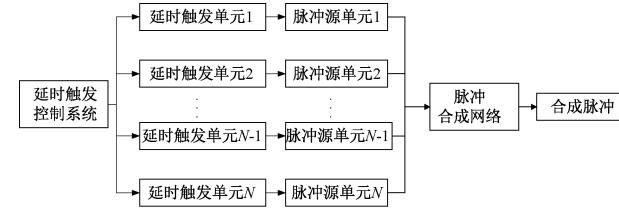


图 1 可重构脉冲合成原理

Fig. 1 Schematic of configurable pulse combination

采用脉冲合成产生 kV/MHz 高重频可重构脉冲是指脉冲源单元在高精度外触发系统触发下输出亚纳秒脉冲,之后通过脉冲合成实现输出端功率叠加和电压提升^[9],最终获得 kV/MHz 高重频脉冲输出。不仅如此,该方法通过精确配置延时触发控制系统输出触发信号时间,可将多个相互独立的脉冲源单元的按照给定时间序列依次输出并合成,从而实现不同工作模式灵活切换以满足不同场景的应用需求,具体包括:

模式 1 为高脉冲电压输出,即通过延时触发控制系统调节各脉冲源单元同步输出并合成,在输出通道实现功率叠加,从而以最高幅度输出 kV/MHz 脉冲。

模式 2 为可编程波形输出,即通过精确控制延时触发控制系统调的触发信号输出,可实现对脉冲前沿和脉宽等合成脉冲输出参数的灵活调节。

模式 3 为高重频脉冲输出,即通过控制各脉冲单元的输出延时依次间隔固定时间,从而实现输出脉冲重复频率倍增^[10-11]。

在 kV/MHz 高重频可重构脉冲合成设计中,为实现各工作模式的稳定运行,需解决如下关键技术问题:

1)高重频低抖动脉冲源单元。脉冲源单元是实现 MHz 高重频亚纳秒脉冲输出的关键,为确保合成效率同时还要求其在外触发条件下输出低抖动,从而在合成网络输出端实现功率叠加。

2)脉冲延时触发网络。延时触发网络用于触发脉冲

源,其不仅影响脉冲源输出抖动,同时也是实现可重构脉冲输出的关键,难点是触发信号既要具备快前沿和快电压上升速率,又要在时基上精确可调。

3) 脉冲合成网络。脉冲合成网络用于将各单元脉冲系统依据设定的输出模式进行高效率功率合成,要求其具备高带宽、低损耗和高通道隔离度等关键性能参数。

2 kV/MHz 高重频可重构脉冲关键技术

2.1 高重频高稳定度脉冲源单元设计

高重频亚纳秒脉冲的产生要求固态开关具备极快开关速度和恢复时间^[12]。本文主要采用选用低压 NPN 型宽带射频晶体管作为脉冲产生电路开关,具备数 MHz 高重复频率下工作能力,且该晶体管在过压导通工作模式下能够高重复频率长时稳定运行。为解决基于该型开关的脉冲产生电路输出电压较低问题,采用了基于多级 Marx 电路的脉冲源单元电路设计。

多级 Marx 电路能够产生幅值远高于电源电压的脉冲,典型电路如图 2 示,其中 V_{cc} 为直流偏置电压, R_L 为负载电阻。静态时,直流源通过 R_c 、 R'_c 给电容 C 充电,开关处于临界导通状态;触发信号输入时,第一级开关首先导通,第一级电容左端瞬间接地,右端电路变为 $-V_{cc}$,此时第二级开关在过电压和快前沿复合作用下导通;以此类推,后级开关依次导通,电容向负载放电,负载电压幅值 V_m 估算式为:

$$V_m = \frac{R_L}{r + R_L} V_s \quad (1)$$

式中: r 为输出脉冲峰值处的 Marx 电路等效内阻, V_s 为源等效电压^[13]。

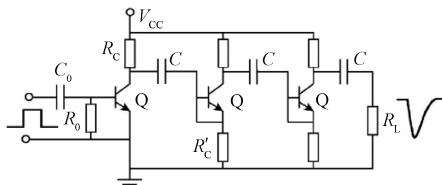


图 2 多级 Marx 电路

Fig. 2 Multi-grade Marx circuit

在 Marx 电路设计中通常需要考虑两个方面问题:一是充电时间,对于典型 Marx 电路采用的 RC 充电回路,电路充电时间约为 $3R_c$ 时间常数^[14],电容值 C 越小,电路运行重复频率越高,但输出脉冲幅度越低。综合考虑高重复频率和输出脉冲幅度的设计要求,电路储能电容 C 值取 100 pF 以下、充电电阻 R 值取 1.5 kΩ 以下较合适;二是电路级数设计,多级 Marx 电路通过多级储能电容并联充电、串联放电实现输出幅度的倍增提升,但在实

际设计过程中随着级数的增加,Marx 电路的电压叠加效率将显著降低,在大约 12 级时输出脉冲幅值开始出现饱和趋势^[15]。

除此之外,脉冲源输出波形稳定性和时基稳定性也是影响后续通道功率合成效率的关键影响因素。脉冲源选择的低压 NPN 型宽带射频晶体管本身是成熟产品,具有高可靠性、高稳定性、高一致性与长寿命等优点,基于该开关设计的脉冲源本身具有高波形稳定度优点,其输出时基存在短时抖动和长时漂移两部分影响因素。短时抖动由开关状态转换电平范围、电路内部随机热噪声及触发控制信号的固有短时抖动(约 10 ps)共同决定^[15]。实验结果表明,利用高上升沿斜率、低抖动的触发控制信号,能够将脉冲源单元的短时抖动控制在数 10 ps 内^[16];长时漂移与开关工作点位置有关,而开关工作点受器件温度影响,可通过采取风冷散热措施为脉冲源提供良好的散热条件,避免因排热不及时导致器件温度持续上升的情况^[17]。

图 3 给出了脉冲源单元设计电路 PCB 图。Marx 电路级数选取 12 级,为提高脉冲源单元的输出幅度,提升装置紧凑化程度,利用贴片式合成器将 4 个并联 Marx 电路产生的脉冲进行输出合成。

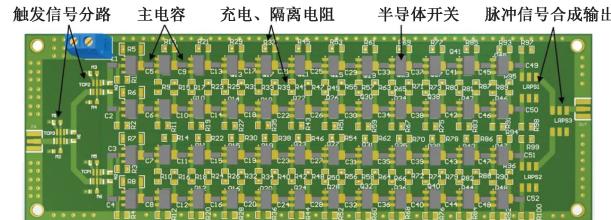


图 3 脉冲源单元 PCB 图

Fig. 3 PCB structure of pulse generator unit

图 4 给出了实测脉冲源单元在 50 Ω 负载下实测结果。其输出幅度 200 V,上升时间 350 ps,半高脉宽 950 ps,在 1 MHz 重复频率下可长时运行,输出脉冲峰值抖动小于 1% (Std),脉宽与前沿抖动均小于 10 ps (Std),长时漂移小于 10 ps/min,短时抖动小于 30 ps (Std)。

2.2 脉冲延时触发网络

高精度多路延时触发控制技术是亚纳秒/纳秒脉冲源合成的关键之一,主要功能是产生多路可以精确控制延迟的快前沿、低抖动的阶跃电平信号,用于触发脉冲源单元产生脉冲信号^[18-19]。传统延时触发控制系统大多基于 FPGA 数字电路实现,所产生触发控制信号上升沿斜率较低,通过电缆传输存在电磁兼容和前沿畸变等问题,且可控制单元数量少,难以满足数十路~百路多单元脉冲线路合成需求。为解决该问题,文中采用基于光纤传输的同步触发控制系统,信号处理模块放置于屏蔽结构

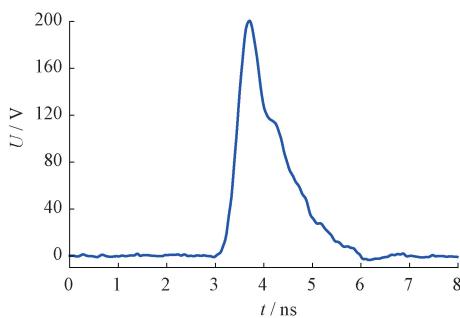


图 4 脉冲源单元输出波形

Fig. 4 Waveform of pulse generator unit

内,触发控制信号通过光纤传输,其优点为控制单元数量多、抗电磁干扰能力强、传输信号畸变小。

延时触发控制信号精度是决定脉冲合成效率的重要参数,提高触发信号精度的主要途径是降低其延时抖动。参考文献[20],当考虑延时抖动 Δt 满足正态分布的情况,高斯/类高斯脉冲合成效率预估表达式如下:

$$\langle \eta \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{8\pi\Delta t^2}{\tau^2}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\Delta t^2}{2\sigma^2}\right) d\Delta t = \frac{1}{\sqrt{16\pi(\sigma/\tau)^2 + 1}} \quad (2)$$

式中: σ 为延时抖动分布的标准差, τ 为脉宽常数^[20]。当自变量 σ/τ 小于0.05时,合成效率接近95%,因此为保证较高的合成效率,针对图4所示的脉冲源单元输出半高脉宽950 ps类高斯波形,为达到95%脉冲合成效率则要求延时抖动分布的标准差 σ 达到47 ps。

系统选用的高精度延时芯片调节步进可达10 ps、控制精度可达10 ps、控制范围可达0~10 ns。图5(a)给出了实测触发控制信号波形,系统输出触发信号上升时间约1.0 ns,峰值幅度约8.0 V,上升沿斜率约8 V/ns,固有时基短时抖动<15 ps,可稳定高效触发脉冲源单元,并实现高效率脉冲合成。图5(b)给出了延时控制精度测试结果,系统在0~10 ns范围内对输出触发信号可实现10 ps级高精度延时控制调节。

2.3 脉冲合成网络

合成器是线路合成的基础和要点,为同时满足超宽带、高隔离度与小型化需求,本文选用变压器形式的二合一 Wilkinson 合成器,其传输线变压器部分由传输线环绕铁氧体磁芯构成,其具有超宽带(覆盖 MHz~GHz)、低插损、小尺寸等优点^[21~22],通过在输入端增加隔离电阻,可有效提升端口隔离度。

本文选择基于传输线变压器的单级超宽带功率合成器,工作频带范围达到5 MHz~1 GHz。图6给出了合成器性能实测结果,合成器最大插入损耗≤0.7 dB、电压驻波系数≤1.2,脉冲输入端口的隔离度优于-20 dB。

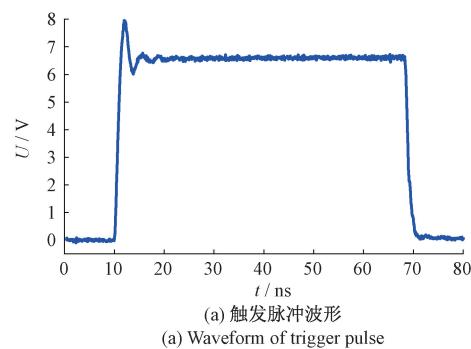
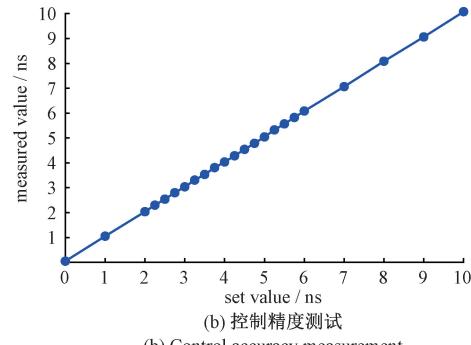
(a) 触发脉冲波形
(a) Waveform of trigger pulse(b) 控制精度测试
(b) Control accuracy measurement

图 5 触发系统测试结果

Fig. 5 Performance test result of trigger

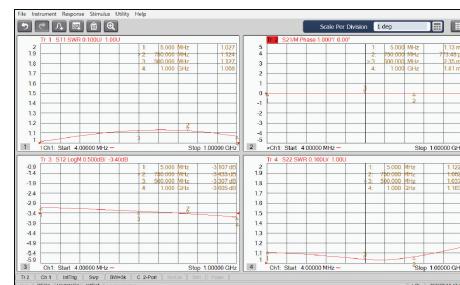
(a) 输入驻波比、相位一致性、插入损耗、输出驻波比
(a) Input VSWR, phase consistency, insertion loss, output VSWR(b) 端口隔离度
(b) Port isolation

图 6 合成器性能测试结果

Fig. 6 Performance test result of combiner

脉冲源单元输出幅度仅200 V,为达到kV量级输出需要以现有二合一 Wilkinson 合成器为基础进行逐级级

联。对于 N 级二进制级联功率合成网络, 假定每级合成网络相同条件下, 合成脉冲与幅度表达式如下:

$$P_{\text{OUT}} = 2^N \cdot P \cdot L^{-N} \quad (3)$$

$$V_{\text{OUT}} = \sqrt{2^N \cdot P \cdot L^{-N}} \quad (4)$$

式中: L 为单级合成插损, P 为各路脉冲源单元信号功率, N 为合成级数。可以看出, 随着电路损耗和合成级数的增加, 脉冲合成功率下降显著, 因此高效率合成网络设计既需降低插入损耗 L , 也需合理控制级联级数 N ^[23]。结合考虑上述因素, 本文采用 5 级 32 路二进制级联线路功率合成网络, 预估结果表明, 单级合成效率约 95%, 脉冲合成网络总合成效率约 77%。

3 kV/MHz 高重频可重构脉冲源测试

3.1 原理型实验装置

kV/MHz 高重频可重构脉冲源原理型装置如图 7(a) 与(b) 所示, 由 32 个脉冲源单元组合、5 级脉冲合成网络、基于光纤的高精度延时触发网络等构成, 脉冲源采用直流开关电源进行供电, 外置亚克力卡槽用于固定并列式脉冲源单元, 卡槽上方开圆孔安装散热风扇, 可为脉冲源提供风冷散热。设备尺寸约 45 cm×40 cm×15 cm, 整体质量约 5 kg, 功耗约 300 W。

3.2 高脉冲电压输出模式测试

图 6 给出了脉冲源采用高脉冲电压输出模式时测试结果, 其中, 测量采用 Lecroy waveMaster 806Zi-B 型号示波器, 实时带宽 6 GHz, 采样率 40 GS/s, 输入端接入 60 dB 大功率脉冲衰减器。

由图 8 可以看出, 该装置在 1 MHz 重频下实测脉冲幅度约 1.0 kV、上升时间 600 ps、半高脉宽为 950 ps, 总合成效率约 78%, 单级合成效率约 95%。

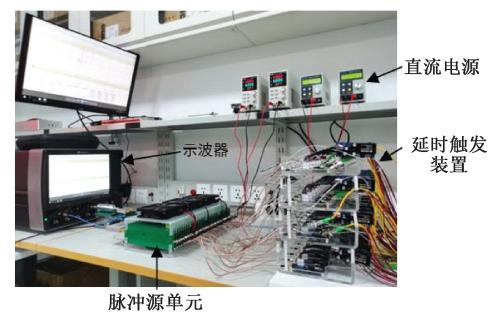
高重频工作模式下脉冲产生电路的热耗将造成元器件在短时间内温度骤升并进而失效, 是影响脉冲源高重频运行稳定可靠性的主要因素之一。图 9 给出了脉冲源单元在 1 MHz 重频下连续运行 10 min、输出约 6×10^8 个脉冲后电路表面热成像测试结果。结果显示该脉冲产生电路 PCB 温度在风冷散热时可稳定在 30 ℃ 左右。

3.3 可编程波形输出模式测试

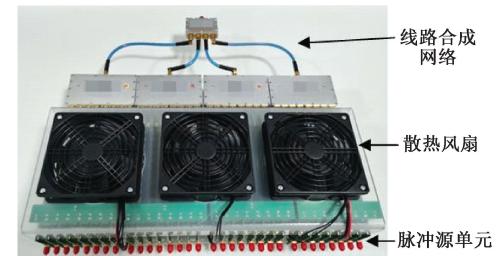
可编程波形输出模式是指在脉冲源延时触发控制系统输出可控触发信号下, 按照预先设定时间序列精确依次触发各脉冲源单元, 从而实现对合成后输出脉冲前沿时间和波形等参数的调节。在理想合成网络下, 合成脉冲与脉冲源单元的时域电压关系表达式如式(5)所示。

$$V_{\text{OUT}}(t) = \sqrt{\sum_i^N V_i(t + \Delta t_i)} \quad i \in [1, N] \quad (5)$$

式中: $V(t)$ 为脉冲源对应时域电压表达式, N 为脉冲源单



(a) 实验装置图
(a) Photo of experimental facility



(b) 脉冲源单元与合成电路
(b) Pulse generator unit and synthesis circuit

图 7 脉冲源装置图

Fig. 7 Photo of pulse generator

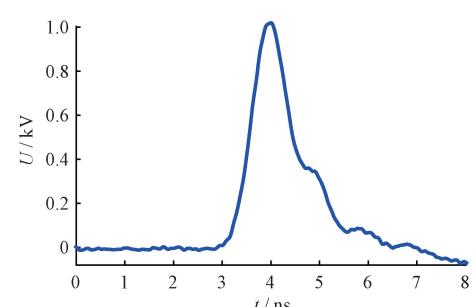


图 8 同步合成输出波形

Fig. 8 Output waveform of synchronous synthesis

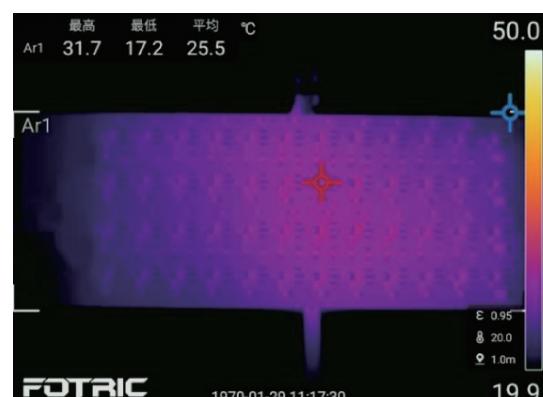


图 9 PCB 热成像测试图

Fig. 9 Thermal imager of PCB

元数量, Δt_i 为各脉冲源单元的输出延时设定值。

图 10 为通过波形拟合得到的不同上升时间的类高斯脉冲波形, 其上升时间在 600~1 680 ps、半高脉宽在 1~3 ns 范围连续可调。图 11 为通过波形拟合得到上升沿时间 1.1 ns, 半高宽分别为 2.9、3.1 和 3.5 ns 3 种方波脉冲, 脉冲顶部平坦度小于 4%。

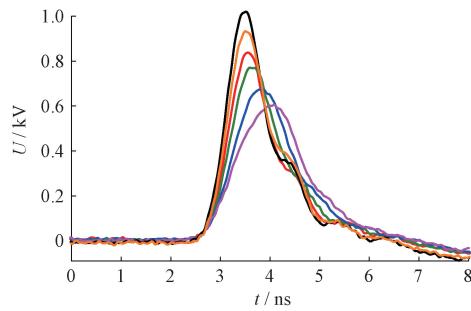


图 10 类高斯脉冲波形

Fig. 10 Waveform of similar gaussian pulse

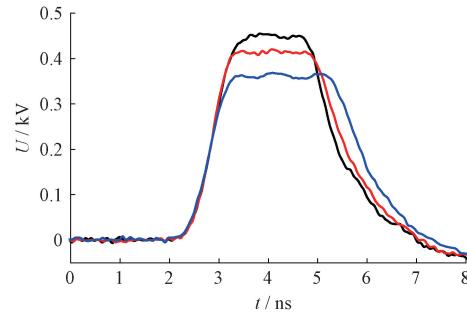


图 11 类方波脉冲波形

Fig. 11 Waveform of similar square wave pulse

现有研究结果表明, 不同脉冲上升沿、脉冲波形对于生物和元器件电磁环境效应、密闭腔体电磁耦合特征和部分发光器件效率等都存在重要影响^[24]。从已有文献调研来看, 国内外现有百 V~kV 量级 MHz 高重频脉冲源尚不具备脉冲上升时间和输出波形连续可控调节能力, 基于延时触发控制技术实现可编程波形对于后续该脉冲源在上述更多领域应用具有重要意义。

3.4 高重频脉冲输出模式测试

利用延时触发控制系统将 32 路脉冲源单元调节至输出同步进行合成, 可输出如图 12 所示重频 1 MHz、脉冲幅度 1 kV 级亚纳秒脉冲。

通过调整控制各脉冲单元输出延迟时间, 可实现脉冲源输出脉冲重复频率的灵活调节。本文中脉冲源由 32 个脉冲源单元组成, 最大可输出重复频率达数十 MHz 超高重频亚纳秒脉冲。图 13 为实测重复频率约 50 MHz、幅度 90 V 的亚纳秒超高重频脉冲波形。

3.5 与国外典型高重频脉冲源产品指标对比

系统关键技术国产化是摆在当前业界仪器设备研究工作中的重要任务, 文中研制的脉冲源已基本实现国产

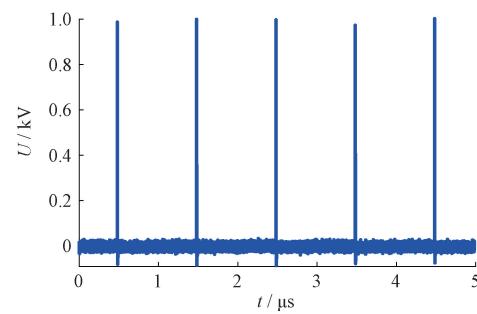


图 12 1 MHz 重复频率脉冲波形

Fig. 12 Waveform of 1 MHz repetitive frequency

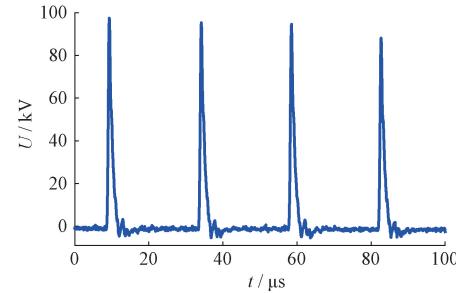


图 13 50 MHz 重复频率脉冲波形

Fig. 13 Waveform of 50 MHz repetitive frequency

化设计, 表明已初步突破 kV/MHz 高重频可重构脉冲源核心技术, 实现了超高重频 kV 级脉冲源的国产化。

表 1 同时给出了本文研制的脉冲源与德国 FID 公司同类型产品指标比对结果。可以看出, 该脉冲源在核心关键指标上达到与德国 FID 公司同类型产品相同水平, 且同时还具备脉冲上升时间、半高脉宽和重复频率等波形参数的灵活调节能力, 从而具备更为广泛的应用价值。

表 1 国内外部分典型高重频脉冲源主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of partial typical high repetition pulse generators

机构	幅度/kV	前沿/ns	脉宽/ns	重频/MHz	时间
德国 FID	1.0 (max)	0.2~0.3 (fixed)	0.7~1.0 (fixed)	1	2022
本单位	1.0 (max)	0.6~1.6 (adjustable)	1.0~3.0 (adjustable)	1	2023

4 结 论

本文提出了 kV/MHz 高重频可重构脉冲源设计方法, 研究解决了高重频可重构脉冲产生关键技术问题, 在此基础上研制了脉冲源原理型装置, 并分别对脉冲源 3 种工作模式的输出参数进行了测试验证。结果表明, 该装置工作在模式 1 时可输出最高幅度 1 kV、上升时间 600 ps、半高脉宽 950 ps 的脉冲; 工作在模式 2 时可输出

类高斯脉冲、方类波脉冲,且脉冲波形参数在一定范围连续可调;工作在模式3时可输出数MHz~数十MHz超高重复频率的亚纳秒窄脉冲。后续计划将该设计方法结合神经网络算法开展深入研究,根据应用需求开展延时设定序列的编程与训练,进一步提升脉冲源输出幅度,不断优化波形合成方案,生成多种定制目标波形,对上升时间、半高脉宽、输出幅度等参数实现高度可编程与高精度调节^[25],积极推动kV/MHz高重频可重构脉冲产生技术的不断发展进步。此项研究内容对“智能化脉冲”研究方向的发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 石小燕,梁勤金,郑强林. 1 kV/800 kHz 亚纳秒脉冲发生器设计[J]. 电讯技术,2016, 56(9):1049-1052.
SHI X Y, LIANG Q J, ZHENG Q L. Design of a 1 kV/800 kHz sub-nanosecond pulse generator [J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56 (9): 1049-1052.
- [2] 江伟华. 高重复频率脉冲技术及其应用:(1)概述[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(1):10-15.
JIANG W H. Repetition rate pulsed power technology and its applications: (I) Introduction[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1):10-15.
- [3] 杨景红,刘超,杨明. 高重复频率纳秒级脉冲发生器研究[J]. 微波学报,2020,36(3):65-70.
YANG J H, LIU CH, YANG M. Study on high repetition frequency nanosecond pulse generator [J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(3):65-70.
- [4] 梁勤金. 固态高功率高重频脉冲源的研究与发展[J]. 电讯技术,2019,59(10):1227-1236.
LIANG Q J. Research and development of solid state high power high repetition frequency pulse source [J]. Telecommunication Engineering, 2019, 59 (10): 1227-1236.
- [5] 黄寅,孟永鹏,黄彦钦,等. 一种双回路驱动的纳秒快前沿高重复频率脉冲源[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(10):114-122.
HUANG Y, MENG Y P, HUANG Y Q. A pulse source with dual-loop driven nanosecond fast risetime and high repetition frequency [J]. Journal of Xi' an Jiaotong University, 2021, 55 (10): 114-122.
- [6] GREKHOV I V. Pulse power generation in nano- and subnanosecond range by means of ionizing fronts in semiconductors: The state of the art and future prospects[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38 (5): 1118-1123.
- [7] MERENSKY L M, KARDO A F, SHMILOVITZ D, et al. Efficiency study of a 2.2 kV, 1 ns, 1 MHz pulsed power generator based on a drift-step-recovery diode[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41 (11): 3138-3142.
- [8] 梁勤金,石小燕,曹晓阳,等. 一种先进高压纳秒脉冲合成器设计[J]. 无线电工程,2010,40(7):16-18.
LIANG Q J, SHI X Y, CAO X Y, et al. Design of an advanced high voltage nanosecond pulser power synthesizer[J]. Radio Engineering, 2010, 40 (7): 16-18.
- [9] 赵敏,周星,王庆国,等. 全固态快沿脉冲源功率合成的设计与分析[J]. 强激光与粒子束,2015,27(10):164-168.
ZHAO M, ZHOU X, WANG Q G, et al. Design and analysis on power synthesis of all-solid state pulse source with fast-edge [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(10):164-168.
- [10] 江伟华. 高重复频率脉冲技术及其应用:(5)脉冲叠加的意义[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25 (8): 1877-1882.
JIANG W H. Repetition rate pulsed power technology and its applications: (V) The implication of pulse adding[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25 (8): 1877-1882.
- [11] 张伟,刘百玉,阮驰,等. 利用频率叠加的方法实现高重频高压窄脉冲源[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7):1257-1262.
ZHANG W, LIU B Y, RUAN C H, et al. High-repetition-frequency high-voltage narrow pulse source achieved by frequency superposition [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7):1257-1262.
- [12] 江伟华. 高重复频率脉冲技术及其应用:(4)半导体开关的特长与局限性[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(3):537-543.
JIANG W H. Repetition rate pulsed power technology and its applications: (V) Advantage and limitation of semiconductor switches [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25 (3): 537-543.
- [13] 赵政,钟旭,李征,等. 基于雪崩三极管的高重频高压纳秒脉冲产生方法综述[J]. 电工技术学报,2017,32(8):33-47,54.
ZHAO ZH, ZHONG X, LI ZH, et al. Review on the methods of generating high-repetitive-frequency high-voltage nanosecond pulses based on avalanche transistors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32 (8): 33-47,54.
- [14] 郭玉萍,倪原,李智,等. 非接触生命探测雷达中的脉冲发生器的设计[J]. 生命科学仪器,2008,6(3):57-60.

- GUO Y P, NI Y, LI ZH, et al. Design of impulse generator on non-contact life detecting radar [J]. Life Science Instruments, 2008, 6(3):57-60.
- [15] 袁雪林,张洪德,徐哲峰,等.基于雪崩三极管的高重频高稳定度脉冲源研究[J].固体电子学研究与进展,2010,30(1):64-68.
- YUAN X L, ZHANG H D, XU ZH F, et al. Research on high-repetition and high-stability pulser based on avalanche transistor. [J]. Research & Progress of SSE Solid State Electronics, 2010, 30(1):64-68.
- [16] 袁雪林,乔汉青,浩庆松,等.触发脉冲对雪崩管脉冲源的影响[J].强激光与粒子束,2016,28(3):210-212.
- YUAN X L, QIAO H Q, HAO Q S, et al. Influence of trigger pulse on pulse on pulse generator based on avalanche transistor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(3):210-212.
- [17] 赵敏,王庆国,周星,等.高稳定度全固态脉冲源的优化设计与评估[J].高电压技术,2015, 41(3):1015-1020.
- ZHAO M, WANG Q G, ZHOU X, et al. Research and design on high-stability of all-solid-state pulse source [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3):1015-1020.
- [18] 潘昭浩,张政权,刘庆想,等.高精度多路脉冲延时技术[J].强激光与粒子束,2021,33(10):124-129.
- PAN ZH H, ZHANG ZH Q, LIU Q X, et al. High-precision multi-channel pulse delay technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33 (10): 124-129.
- [19] 李军,虎雷,李永明,等.一种高精度可延时同步脉冲产生系统[J].数字技术与应用,2018, 36(7):182-184.
- LI J, HU L, LI Y M, et al. Design of high accuracy and delayed synchronization pulse generation system [J]. Digital Technology and Application, 2018, 36 (7): 182-184.
- [20] 蒋廷勇,宁辉,邵浩,等.微波短脉冲时域合成效率研究[J].微波学报,2016,32(1):17-20.
- JIANG T Y, NING H, SHAO H, et al. Research on combination efficiency of microwave short-pulse in time domain [J]. Journal of Microwaves, 2016, 32 (1): 17-20.
- [21] DONG I K, SANG W J, YOUNG Y. A high performance transformer-type Wilkinson power splitter with compensating circuit for CATV transmission system and optimal design method [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(3):934-940.
- [22] 史道玲,水炜.一种基于铁氧体的低频超宽带功分器设计[J].太原学院学报(自然科学版),2019,37(1):66-69.
- SHI D L, SHUI W. Design of low frequency ultra-wideband power divider based on ferrite[J]. Journal of Taiyuan University (Natural Science Edition), 2019, 37(1):66-69.
- [23] 董士伟,王颖,李军,等.微波毫米波功率合成技术[M].上海:上海交通大学出版社,2012.
- DONG SH W, WANG Y, LI J, et al. Microwave Millimeter Wave Power Synthesis Technology [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2012.
- [24] 李成祥,姚陈果,孙才新,等.脉冲电场上升沿对细胞跨膜电位的影响分析[J].高电压技术,2006,32(1):54-56.
- LI CH X, YAO CH G, SUN C X, et al. Effects of the rising edge of pulsed electric field on the transmembrane voltage[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32 (1): 54-56.
- [25] 付在明.高速脉冲波形合成关键技术研究[D].成都:电子科技大学,2020.
- FU Z M. Research on key technology of synthesizing high-speed pulse waveform [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.

作者简介



王殿喜,2020 年于国防科技大学获得学士学位,现为西北核技术研究所助理工程师,主要研究方向为瞬态强电磁脉冲产生技术。

E-mail: 1770105755@qq.com

Wang Dianxi received his B. Sc. degree from National University of Defense Technology in 2020. Now he is an assistant engineer in Northeast Institute of Nuclear Technology. His main research interest includes transient intense electromagnetic pulse generation technology.



蒋廷勇(通信作者),2016 年于清华大学获得博士学位,现为西北核技术研究所高级工程师,主要研究方向为强电磁脉冲环境效应。

E-mail: jty725@aliyun.com

Jiang Tingyong (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Tsinghua University in 2016. Now he is a senior engineer in Northeast Institute of Nuclear Technology. His main research interest includes high power electromagnetic environment effect.