

文章编号: 2095-4980(2016)03-0413-04

瞬时超宽谱脉冲串产生方式

陆 巍, 丁恩燕, 杨周炳, 刘天文

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 通过对国内外瞬时多脉冲产生技术的调研, 结合超宽谱脉冲的特点, 开展脉冲分割方式产生超宽谱多脉冲、形成线串联方式产生超宽谱多脉冲、多脉冲合成方式产生超宽谱多脉冲的技术研究, 确定利用形成线串联方式产生超宽谱多脉冲的技术路线; 对充电时间和开关电容等对产生多脉冲的影响因素进行分析和实验研究, 改进了四脉冲形成线充电方式, 完成超宽谱四脉冲产生实验装置的设计, 在负载上获得瞬时超宽谱多脉冲, 脉冲数 4 个, 脉冲宽度 3.5 ns, 输出脉冲之间的间隔小于 10 ns。

关键词: 超宽谱; 开关; 脉冲形成线; 多脉冲

中图分类号: TN782

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201603.0413

Generation technology of instant UWB multi-pulse

LU Wei, DING Enyan, YANG Zhoubing, LIU Tianwen

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The generation of UWB(Ultra Wide-Band) multi-pulse is studied through the investigation, combined with the characteristics of UWB pulse. The technical research includes the UWB multi-pulse generation by the means of pulse sequence, forming line in series connection, and multi-pulse synthesis. The technical way of generating UWB instant multi-pulse by the means of forming line in series connection is confirmed. The effects of charging time and switched capacitor on multi-pulse generation are analyzed and the experiments are also conducted. The charging method of four-pulse forming line is improved. The design of experiment equipment used for the generation of UWB 4 pulses is completed. The UWB instant multi-pulse is obtained on the load, which have the characteristics of 4 pulses, pulse width of 3.5 ns, pulse interval below 10 ns.

Key words: Ultra Wide-Band; switch; pulse forming line; multi-pulse

超宽谱(UWB)脉冲具有宽频带的特性, 辐射出的超宽谱微波容易覆盖目标的响应频率, 使其具有非常广阔的应用前景, 近年来超宽谱相关技术得到较快发展。随着国内外高功率超宽谱脉冲产生技术的发展, 再继续提高单脉冲的峰值功率比较困难; 希望提高脉冲的重复频率。目前的超宽谱功率源的重复频率一般为 100 Hz, 提高到几百 Hz 到 kHz 量级已是极限^[1-4]; 要实现 MHz 以上的重复频率, 需要采用新的研究方法和技术路线, 技术上的主要难点是开关技术。本文首先介绍了国内外瞬时多脉冲的研究, 结合超宽谱脉冲的特点, 设计了 3 种方式开展瞬时多脉冲超宽谱产生技术验证研究, 分别为脉冲分割产生方式、形成线串联产生方式和多脉冲合成方式。通过对不同技术路线的研究, 探索新的超宽谱脉冲产生方式。

1 国内外研究现状

国内外有多家科研机构开展多脉冲产生技术的研究工作。

a) 美国洛斯·阿拉莫斯实验室对 Phermex 机进行多脉冲改造已有 20 年历史^[5-6], 直到 1997 年才实现双脉冲输出。采用串接式结构, 用 2 台各自的 Marx 发生器, 分别对各自的脉冲形成线充电至 1.4 MV, 开关为激光触发开关。第 1 个开关的导通维持时间能延长到第 2 个开关的导通, 确保第 2 段脉冲形成线的输出; 两脉冲间

隔可在一定范围内调节。b) 基于高压隔离硅堆的多脉冲系统，通过脉冲汇流/隔离网络实现多个脉冲的汇合^[7]，且不会相互影响，汇合后的多个脉冲输出到负载，通过调节单个脉冲的输出时间获得需要的脉冲重复率。高压快恢复硅堆是隔离网络中最关键的部件，很多个小硅堆的串并联设计是硅堆设计的基本思想。c) 美国基于单台 MG17-1C-940PF 型陡化前沿 Marx 发生器，利用 N 台这种发生器向同一个天线馈电可以制作成 Gatling 辐射系统^[8]，使重复频率提高到单台发生器的 N 倍，在猝发工作模式下相邻的输出脉冲间隔最小达到 20 ns。

2 技术验证实验

2.1 脉冲分割方式产生超宽谱多脉冲技术研究

它的原理是先产生一个较宽的纳秒脉冲，利用多段传输线和多个高压纳秒开关，通过开关的延时击穿和传输线的延时，产生多个更窄的纳秒级超宽谱脉冲，脉冲功率不变。关键技术在于各级开关的控制。工作原理如图 1 所示。

这种方式对开关的要求很高，开关导通后，要在一定时间内保持良好的导通状态，这样才尽可能使反射的脉冲经过该开关后不发生波形畸变和能量损失。

设计了传输线和间隙可调的开关，开关导通后，由于气体存在恢复时间，在一定时间内可认为开关一直处于导通状态。实验结果显示，由于开关存在一定的导通电感和导通电阻，会导致被分割脉冲的前沿变缓，同时幅度变小；此外被分割的脉冲还需要经过更多传输过程和更多的导通状态的开关，这些会影响被分割脉冲的幅度和前沿。图 2 和图 3 为验证实验装置图和输出脉冲。

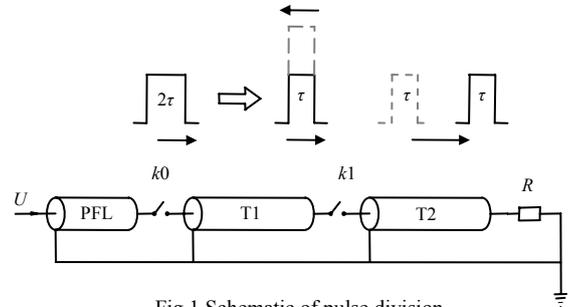


Fig.1 Schematic of pulse division
图 1 脉冲分割方式工作原理图



Fig.2 Experimental study of pulse division
图 2 脉冲分割方式产生多脉冲的验证实验

2.2 形成线串联方式产生超宽谱多脉冲技术研究

它是利用一个电源同时对串联的多个脉冲形成线进行充电，通过充电电感调节每个脉冲形成线的充电电压，开关依次导通后，可获得多个脉冲；由于开关存在一定的恢复时间，可以近似地认为先导通的开关一直保持导通状态。图 4 和图 5 分别为形成线串联方式的模拟电路和模拟结果。高压脉冲电源对多段脉冲形成线同时充电至 U ，此时传输线 $T1$ 和 $T0$ 之间的压差为 U ，而传输线 $T1$ 和 $T2$ 之间的电压差很小，开关 $U1$ 导通，形成第 1 个脉冲，传输线 $T1$ 的电压降为 0，传输线 $T2$ 和 $T1$ 之间的电压差为 U ，此时开关 $U2$ 导通，形成第 2 个脉冲，依次类推可以获得多个脉冲。

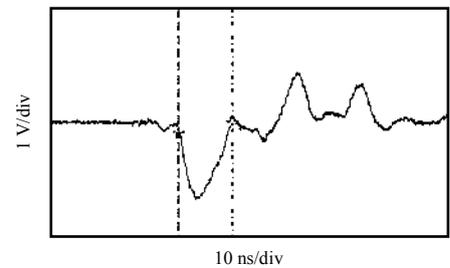


Fig.3 Output pulse of pulse division
图 3 脉冲分割产生多脉冲的输出波形

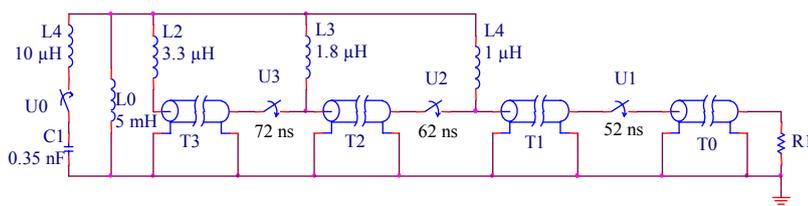


Fig.4 Equivalent circuit of series pulse forming line
图 4 形成线串联方式模拟电路

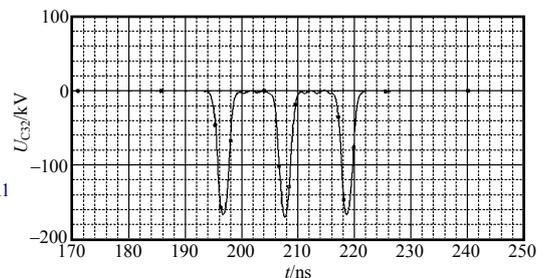


Fig.5 Calculated result of series pulse forming line
图 5 形成线串联方式模拟结果

设计了 2 段脉冲形成线串联产生多脉冲的实验装置，通过对开关电容、隔离电感等参数的优化，获得了较稳定的双脉冲输出，实验装置和实验结果如图 6 和图 7 所示。

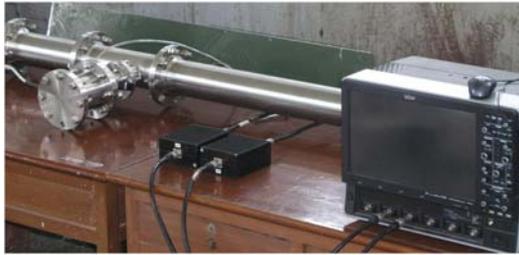


Fig.6 Experimental study of series pulse forming line
图 6 形成线串联方式产生多脉冲的验证实验

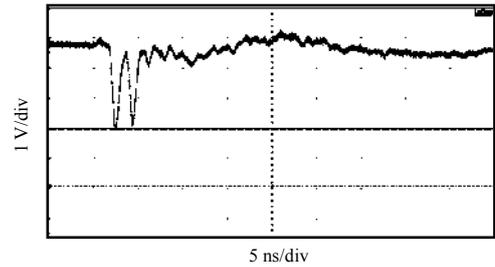


Fig.7 Output pulse of series pulse forming line
图 7 形成线串联方式产生多脉冲的输出波形

2.3 多脉冲合成方式产生超宽谱多脉冲技术研究

它是利用磁性材料的特殊性能，饱和磁导率接近 1，非饱和磁导率很大。在同轴传输线中加入磁性材料，可以通过改变磁导率的方式来实现同轴传输线阻抗的变化。

进行了模拟计算，计算模型如图 8 所示，计算的时域波形分别为图 9 和图 10，图中红色为馈入信号，绿色为反射信号，蓝色为透射信号。

计算结果证明，当正向脉冲馈入时，若此时磁导率很小，则正脉冲能够几乎无影响地通过；当反向脉冲馈入时，若此磁导率很大，则反脉冲无法通过。

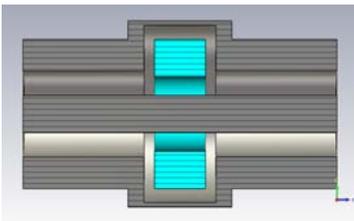


Fig.8 Model of magnetic isolation
图 8 计算模型

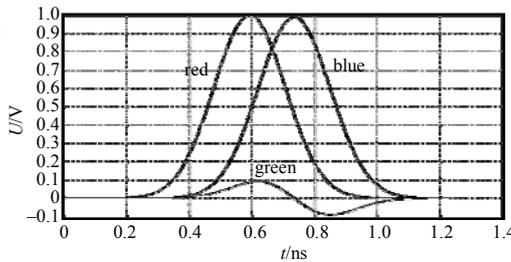


Fig.9 Waveform of $\mu=1$
图 9 磁导率为 1 时的波形

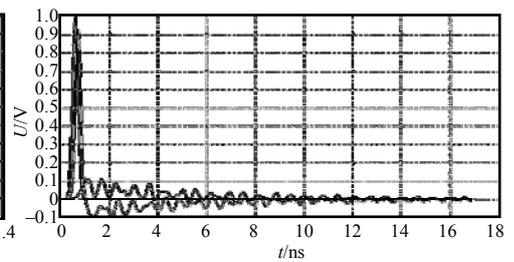


Fig.10 Waveform of $\mu=400$
图 10 磁导率为 400 时的波形

设计了实验装置，如图 11 所示。实验时，首先使磁芯饱和，分别将脉冲电压从装置左、右端口馈入，在另一端测试输出波形，比较两侧测试波形变化。



Fig.11 Experimental study of magnetic isolation
图 11 验证实验装置

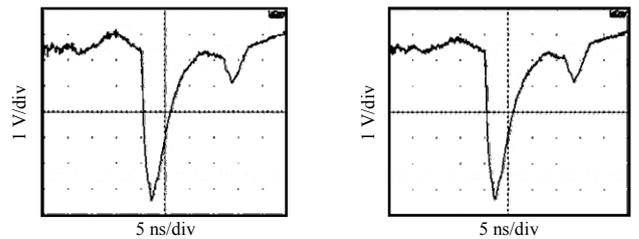


Fig.12 Output pulse of magnetic isolation
图 12 验证实验波形

从实验结果来看，加入磁环并未起到磁隔离的作用，经分析主要原因是磁芯响应速度不够，即在纳秒脉冲下，磁芯的工作点来不及变化。

3 瞬时超宽谱多脉冲产生技术研究

通过以上技术验证研究，形成线串联方式产生超宽谱多脉冲是一种较为可行的技术方式。设计了超宽谱瞬时 4 脉冲产生实验系统，如图 13 所示。

模拟中，由于开关处于理想状态，每段形成线在充电电压基本一致的情况下，输出脉冲的幅度也基本一致；但在实验中，开关导通后并不是一直处于理想的导通状态，导致第 2 个脉冲传输到前一个开关时会有一定的衰减，越后形成的脉冲，衰减会越大。为此，需要对每段形成线充不同的电压，使每段形成线之间有一定的电压梯度，用于补偿开关的衰减损耗带来的影响，图 14 是改进后的模拟充电波形。

超宽谱瞬时四脉冲产生实验系统主要由高压脉冲电源、4 段脉冲形成线、阻抗过渡、传输线、负载等部分组成。多脉冲产生系统利用电感同时对 4 段脉冲形成线进行充电，在低阻抗同轴线上产生瞬时超宽谱多脉冲。为便于传输、测试，在脉冲形成线后接 $10\ \Omega$ 到 $50\ \Omega$ 阻抗变换、 $50\ \Omega$ 传输线和负载等部件。在负载上获得瞬时超宽谱多脉冲，脉冲数 4 个，脉冲宽度 $3.5\ \text{ns}$ ，输出脉冲之间的间隔小于 $10\ \text{ns}$ 。图 15 为典型输出脉冲波形。

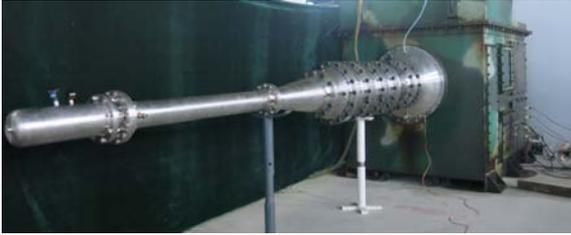


Fig.13 Instant UWB 4-pulse generation system
图 13 超宽谱瞬时 4 脉冲产生实验系统

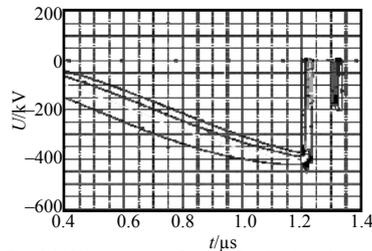


Fig.14 Charge waveform of calculated result
图 14 改进后的模拟充电波形

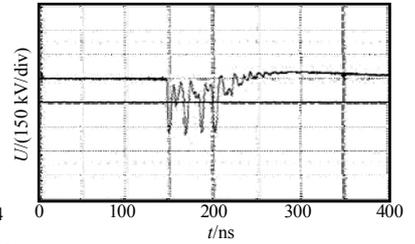


Fig.15 Output pulse of UWB multi-pulse
图 15 瞬时多脉冲输出的典型波形

4 结论

通过对国内外瞬时多脉冲产生技术的调研，结合超宽谱脉冲的特点，开展了 3 种瞬时超宽谱多脉冲产生技术研究，分别为脉冲分割产生方式、形成线串联产生方式和多脉冲合成方式；其中形成线串联方式产生超宽谱多脉冲是一种较为可行的技术方式，按此方式设计了超宽谱瞬时 4 脉冲产生实验系统，在负载上获得瞬时超宽谱多脉冲，脉冲数 4 个，脉冲宽度 $3.5\ \text{ns}$ ，输出脉冲之间的间隔小于 $10\ \text{ns}$ 。

参考文献：

- [1] SHPAK V G,YALANDIN M I,OULMASCOULOV M R,et al. 1 000 pps subnanosecond high voltage generator[C]// IEEE 11th International Pulsed Power Conference. Baltimore,MA,USA:IEEE, 1997:1575-1580.
- [2] LEHR J M,ABDALLA M D,BURGER J W,et al. Design and development of a 1 MV, self break switch for high repetition rate operation[C]// 12th IEEE International Pulse Power Conference. Monterey,CA:IEEE, 1999:1199-1202.
- [3] LEHR J M,BAUM C E,PRATHER W D,et al. Aspects of ultrafast spark gap switching for UWB HPM generation[C]// 11th IEEE pulsed power conference. Baltimore,MA,USA:IEEE, 1997:1033-1041.
- [4] MARTIN J C,MARTIN T H,GUENTHER A H. On Pulsed Power[M]. New York:Plenum Press, 1990.
- [5] 刘锡三. 强流粒子束及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2007:158-159. (LIU Xishan. Intense Particle Beams and Its Applications[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2007:158-159.)
- [6] MORALES R,VENABLE D. Study of preaccelerator-prebunching technique for PHERMEX[R]. Los Alamos,New Mexico, USA:Los Alamos Scientific Lab., 1979.
- [7] 李欣,陈思富,丁亨松,等. 250 kV, 1 MHz 重复率方波三脉冲源[J]. 强激光与粒子束, 2005,17(5):779-782. (LI Xin, CHEN Sifu,DING Hensong,et al. A 250 kV, 1 MHz repetition rate square triple-pulses generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005,17(5):779-782.)
- [8] MAYES J R,CAREY W J,NUNNALLY W C,et al. The Gatling Marx generator system[C]// 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Las Vegas,NV,USA:IEEE, 2002:504-507.

作者简介：



陆 巍(1973-), 男, 江苏省张家港市人, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为脉冲功率技术.email:lw_zsmk@163.com.

丁恩燕(1978-), 女, 山东省德州市人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为脉冲功率技术.

杨周炳(1968-), 男, 四川省绵阳市人, 硕士, 研究员, 主要研究方向为脉冲功率技术.

刘天文(1960-), 男, 陕西省汉中市人, 大专, 技师, 主要研究方向为脉冲功率技术.