

基于差分开关振荡器的宽带电磁脉冲辐射系统^{*}

祝梓钧, 谢彦召, 仇杨鑫

(西安交通大学 电气工程学院, 电力设备电气绝缘国家重点实验室,
瞬态电磁环境与应用国家级国际联合研究中心, 西安 710049)

摘 要: 设计了一种差分开关振荡器,能够产生中心频率 300 MHz 的差分衰减振荡信号,并研制了基于差分开关振荡器和螺旋天线的辐射系统。首先将相同中心频率的差分开关振荡器与单端开关振荡器对比,表明差分开关振荡器的耐压和输出电压是单端开关振荡器的两倍;然后介绍了差分开关振荡器的设计方案,对其阻抗特性和静电场分布进行了分析,仿真了其瞬态工作过程;之后根据差分开关振荡器的输出形式,研制了一种差分注入的螺旋天线,作为系统的辐射天线;最后介绍了该差分型辐射系统在不同辐射距离,不同充气气压下的实验结果,并与单端型辐射系统进行了对比。结果表明,该辐射系统能够产生中心频率 300 MHz,百分比带宽约 20% 的高功率宽带电磁脉冲,最大辐射场强约 18 kV/m,有效电势约 110 kV,场强与单端型辐射系统相比近似提高了 1 倍。

关键词: 高功率宽带电磁脉冲; 差分开关振荡器; 差分螺旋天线; 高场强

中图分类号: TN83 **文献标志码:** A **doi:**10.11884/HPLPB201931.190118

Design and analysis of moderate band radiation system based on differential switched oscillator

Zhu Zijun, Xie Yanzhao, Qiu Yangxin

(School of Electrical Engineering, State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment,
National Center for International Research on Transient Electromagnetics and Application,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new differential switched oscillator is designed to generate a differential damped sinusoidal signal with a center frequency of 300 MHz. Besides, a radiation system based on a differential switched oscillator and associated helical antenna is designed and analyzed. Firstly, the differential switched oscillator with the same central frequency is compared with the single-ended switched oscillator, which shows that the withstand voltage and output voltage of the differential switched oscillator are twice that of the single-ended switched oscillator. Secondly, the design of a differential switched oscillator is introduced. The characteristic impedance and the static electric field distribution of the oscillator are analyzed. The transient performance of the oscillator is simulated. Thirdly, a differential helical antenna is designed as the radiation antenna, in order to match the output form of the differential switched oscillator. Finally, the experimental result with different nitrogen pressure at different radiation distances is introduced. The radiation systems based on single-ended switched oscillator and differential switched oscillator are compared. It is shown that the radiation system can generate a high power mesoband EMP with a center frequency of 300 MHz and a percent bandwidth of about 20%. The maximum intensity of electric field is about 18 kV/m and the radiation factor is about 110 kV. The electric field intensity of the differential radiation system is twice that of the single-ended radiation system.

Key words: high power mesoband EMP; differential switched oscillator; differential helical antenna; high electric field intensity

PACS: 07.50.-e; 07.50.Ek

^{*} 收稿日期:2019-04-19; 修订日期:2019-06-03

作者简介:祝梓钧(1993—),男,硕士,主要从事高功率电磁脉冲源技术研究;zhuzijun2014@126.com。

通信作者:谢彦召(1973—),男,教授,博导,主要从事高功率电磁环境与电磁脉冲,电磁兼容理论与实验技术等研究;yzxie@mail.xjtu.edu.cn。

高功率宽带电磁脉冲具有一定带宽又有相对集中的能谱,且兼备小型化,便携化,成本低等优势,越来越受到广泛关注^[1]。用开关振荡器作为脉冲源是产生高功率宽带电磁信号的一种重要方式,国内外许多研究机构都对其进行了深入研究^[2-3]。开关振荡器由火花间隙开关,低阻传输线和高阻负载组成。其工作过程中,火花间隙开关击穿产生的电信号,由于低阻传输线首末两端阻抗的不匹配,在开关振荡器中来回折反射,在输出端形成了衰减振荡信号。低阻传输线的电长度决定了输出信号的中心频率^[4]。开关振荡器,可以通过增大开关间距,提高气压,更换绝缘介质等方式提高其工作电压。可是若火花间隙开关的工作电压过高,那么充电过程中在其他位置极易发生的故障放电,如内外导体之间通过连接件的沿面放电。绝缘性能成为了限制开关振荡器工作电压进一步提升的主要因素^[5]。开关振荡器分为单端型和差分型两种^[6-7]。国内外的研究机构对单端开关振荡器展开了许多研究。美国的 Giri 等人研制出了一种中心频率 500 MHz 的单端开关振荡器,其工作电压 30 kV^[8]。国防科技大学王俞卫等人研制出了一种中心频率 360 MHz 的油介质的单端开关振荡器^[9]。当前,对于输出电压更高的差分开关振荡器的研究工作,开展得相对较少。为了得到辐射场强更高的宽带电磁脉冲,本文研制了一种基于开关振荡器,并对基于这种振荡器的辐射系统展开研究。

1 差分开关振荡器与单端开关振荡器对比

单端开关振荡器和差分开关振荡器的原理图如图 1 所示。单端开关振荡器工作时是对一个电极充电,电极对地放电,而差分开关振荡器是对两个电极充上极性相反的电压,在两个电极之间进行放电。

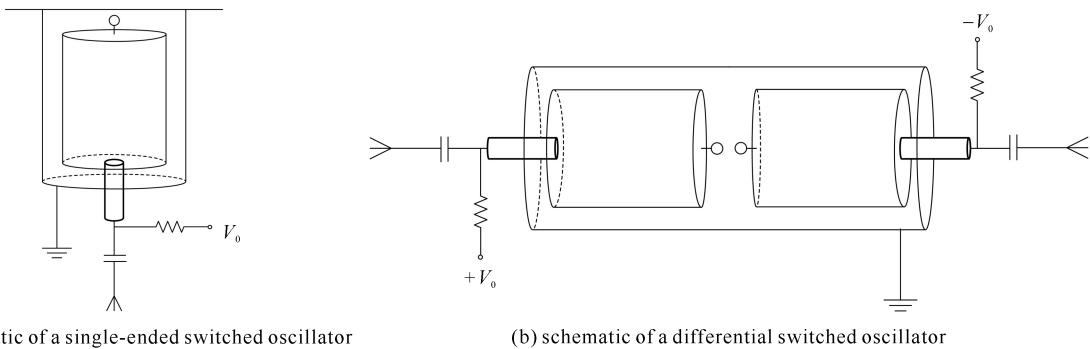


Fig. 1 Schematic of switched oscillators

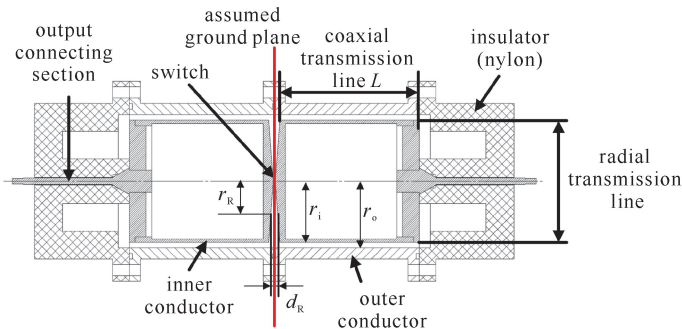
图 1 开关振荡器原理图

从实际结构的角度,差分开关振荡器的相当于两个单端的对接到一块,绝缘距离增加了一倍。由镜像法,可以认为两个内导体中间存在一个厚度为 0 的假想接地面,该平面与外导体相连。差分开关振荡器的耐压是相同中心频率的单端开关振荡器的两倍。从电路结构的角度,差分开关振荡器相当于两个单端的串联。差分开关振荡器的输出电压是相同中心频率的单端开关振荡器的两倍。

2 设计方案

2.1 差分开关振荡器设计方案

差分开关振荡器如图 2 所示,主要由尼龙上盖,引出端,内导体和外导体组成。与单端差分开关振荡器不同的是,差分开关振荡器有两个内导体和两个尼龙上盖,用了两个引出端作为端口,输出差分的信号。两个内



(a) structural schematic of the differential switched oscillator

(b) illustration of the differential switched oscillator

Fig. 2 Differential switched oscillator

图 2 差分开关振荡器

导体同轴心,共用一个外导体。外导体做成两部分是为了在后续实验中,能够将差分开关振荡器拆分成两个单端开关振荡器。

两个内导体的间距从中心向边沿逐渐增大,在最中心也就是距离最近的地方形成了火花间隙开关,其余地方形成阻抗渐变的径向传输线。内导体和外导体形成阻抗恒定的同轴传输线。径向传输线和同轴传输线共同构成了开关振荡器的低阻传输线部分。差分开关振荡器在工作时内部充上高压氮气,作为火花间隙开关和低阻传输线的介质。在高压氮气作为介质的情况下,同轴传输线特征阻抗 Z_{CTL} 计算公式为

$$Z_{CTL} = 60 \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right) \quad (1)$$

式中: r_o 是外导体内半径; r_i 是内导体外半径。

径向传输线中内导体与假想接地面的特征阻抗 Z_{RTL} 计算公式为

$$Z_{RTL} = 30 \frac{d_R}{r_R} \quad (2)$$

式中: d_R 是径向传输线两个内导体之间的距离; r_R 是径向传输线离轴线的距离。

实际设计的结构中, $r_o = 60$ mm, $r_i = 55$ mm, $d_R = 2 \sim 10$ mm, $r_R = 0 \sim 55$ mm。得到差分开关振荡器低阻传输线部分的特征阻抗分布如图 3 所示。在火花间隙开关处,特征阻抗接近于无穷大。随着与火花间隙开关距离的增加,径向传输线的特征阻抗快速减小且变化连续。到径向传输线和同轴传输线交界处时,两边的特征阻抗都约为 5.22Ω ,形成平滑过渡。之后,同轴传输线保持这个阻抗值不变。

利用 CST 软件,仿真得到内导体充电 ± 50 kV 时的静态电场分布,如图 4 所示。火花间隙处的场强最大。场强随着与火花间隙开关的距离的增大在逐渐减小。在火花间隙开关处,场强 459 kV/cm,约为同轴传输线部分内外导体之间场强的 5 倍,确保击穿发生在火花开关间隙。

利用 CST 软件,仿真该模型的瞬态工作过程。两个内导体分别与外导体连接电阻(lumped element 1,2)当作负载,火花间隙开关处设置离散端口模拟开关击穿。仿真结果如图 5 所示,该尺寸下,差分开关振荡器能

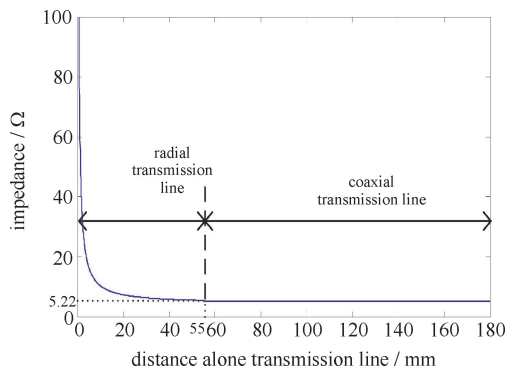


Fig. 3 Characteristic variation distribution of the radial transmission line

图 3 差分开关振荡器特征阻抗分布

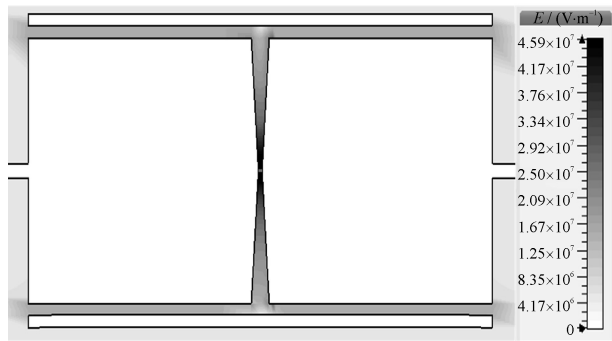
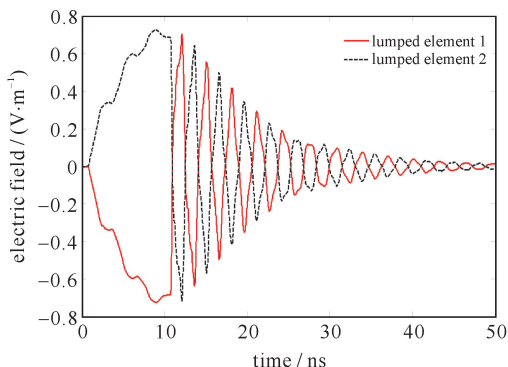
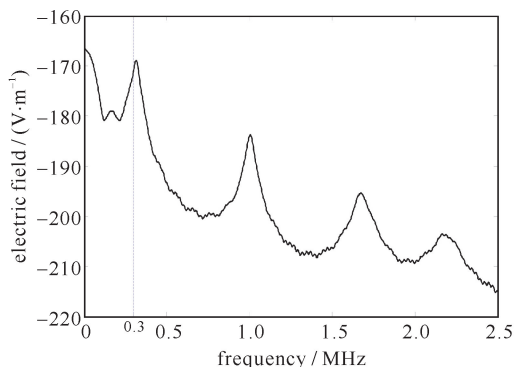


Fig. 4 Static electric field distribution inside the differential switched oscillator

图 4 差分开关振荡器静态电场分布



(a) voltage signal on the lumped elements



(b) spectrum of the voltage signal on lumped elements

Fig. 5 Simulation results

图 5 仿真结果

够产生中心频率约 300 MHz 的差分衰减振荡信号。

2.2 差分螺旋天线设计方案

近些年,人们研究过各种各样的宽带天线作为开关振荡器的辐射天线,如单锥天线,螺旋天线等。这些宽带天线能够与单端开关振荡器配合,将电磁脉冲辐射出去。文献[10]的研究结果表明,轴向模螺旋天线是一种理想的开关振荡器辐射天线,它能够使辐射场有较长的脉冲持续时间和较窄的带宽。

对于差分开关振荡器,若直接将差分输出信号分别馈入两个相同的螺旋天线,那么两个天线各自的辐射场大小相等,极性相反,相互抵消,不能有效将电磁能量辐射出去。若采用巴伦将差分信号转换成单端信号,那么就会损失一部分能量,降低系统的效率。

本文采用差分激励的螺旋天线,即差分螺旋天线,作为差分开关振荡器的辐射天线。考虑起始角度相差 180° ,其他参数都相同,共用一个接地板的两个轴向模螺旋天线,构成一个二元天线阵列。两个螺旋天线分别命名为螺旋天线 a 和螺旋天线 b(如图 6 示),分别馈入极性相反的激励。

为研究这两个天线的辐射特性,先分别研究单个螺旋的情况。将单个螺旋看作一个周长等于中心频率对应波长的平面环,沿线为行波电流^[11]。由于螺旋天线 a 与螺旋天线 b 的起始角度不同,所以圆环 a 与圆环 b 激励的注入端位置也不相同。

假设 $t=0$ 时刻,沿圆环 a 上各个点的行波电流分布如图 7(a)所示。由于两个螺旋天线的激励极性相反,所以圆环 b 上各个点的行波电流分布如图 7(b)所示。圆环上的电流都可以分解为 x 方向和 y 方向。可以看出, $t=0$ 时刻,两个圆环各自的 x 向电流分量反向,而 y 向电流分量是同向的。因此对 z 轴方向的远场而言,两个圆环此时各自辐射的场都来自 $-y$ 向电流,方向和大小相同。

当 $t=T/4$ 时刻,两个圆环上面的电流分布如图 8 所示。可以看出, $t=T/4$ 时刻,两个圆环各自的 y 向电

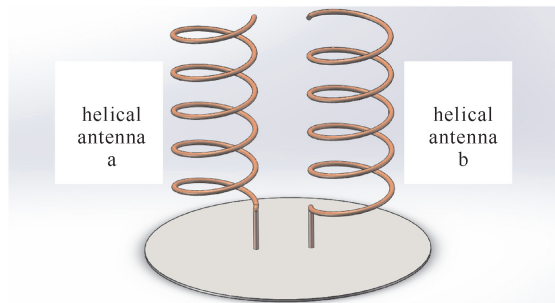


Fig. 6 Two helical antennas with different starting angle

图 6 起始角度不同的两个螺旋天线

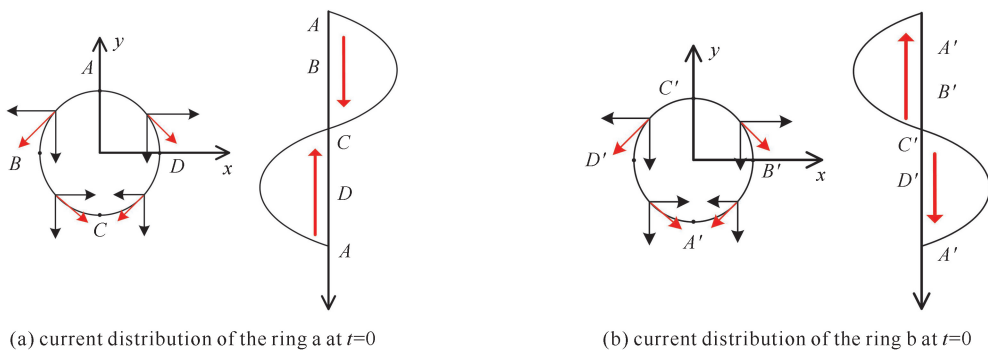


Fig. 7 Current distribution of the rings at $t=0$

图 7 $t=0$ 时刻两个圆环的电流分布

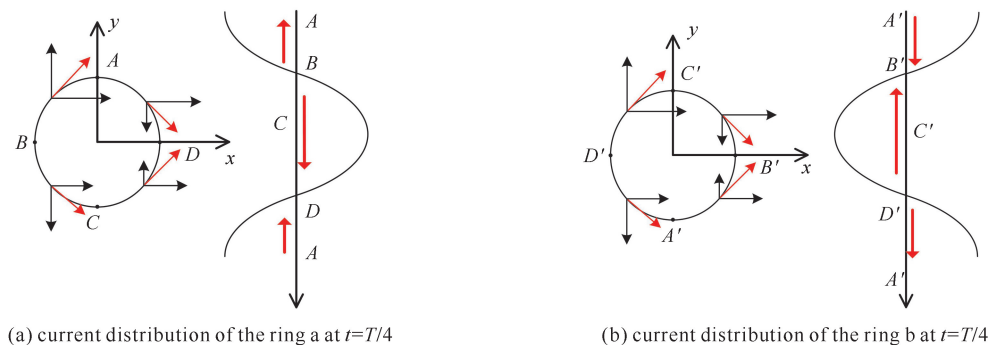


Fig. 8 Current distribution of the rings at $t=T/4$

图 8 $t=T/4$ 时刻两个圆环的电流分布

流分量反向, x 向电流分量是同向的。因此, 对 z 轴方向远场而言, 两个圆环此时各自的辐射场都来自 x 向电流, 方向和大小相同。

显然, 经过一个周期过后, 两个圆环 z 轴方向远场在空间指向都旋转了 360° , 振幅不变, 沿轴向辐射场是圆极化波。并且, 在任意时刻两个圆环的辐射场是相同的。因此, 对于两个起始角度相差 180° , 其他参数都相同的两个螺旋天线, 当注入极性相反的激励时, 能够沿轴向辐射相同的圆极化波。

将这两个螺旋天线组成二元天线阵列, 构成一种差分螺旋天线。二元阵列的单元间距取半个波长, 仿真得到差分螺旋天线的方向图如图 9 所示。差分螺旋天线的半功率波束宽度 34.3° , 旁瓣水平 -21.2 dB, 方向系数 23.9 , 方向性较好。

因此, 该差分螺旋天线, 能够将差分开关振荡器的信号有效辐射出去, 可以作为系统的辐射天线。

3 辐射系统实验结果及分析

基于上述差分开关振荡器和差分螺旋天线, 研制了一套中心频率 300 MHz 的高功率宽带电磁脉冲辐射系统(如图 10 所示)。充电方式为脉冲充电。对系统不同辐射距离, 不同充气气压的辐射场波形分别进行了测试和分析。

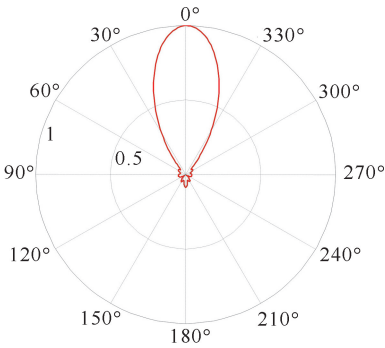
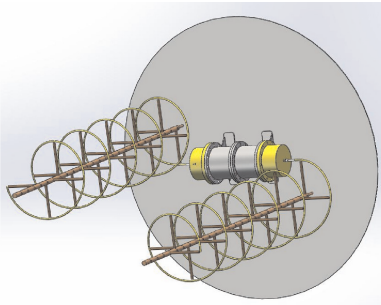
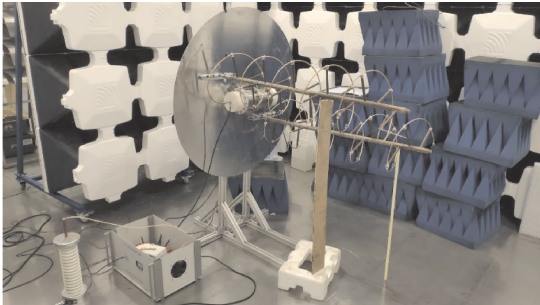


Fig. 9 Radiation pattern of differential helical antenna

图 9 差分螺旋天线方向图



(a) structural schematic of the radiation system

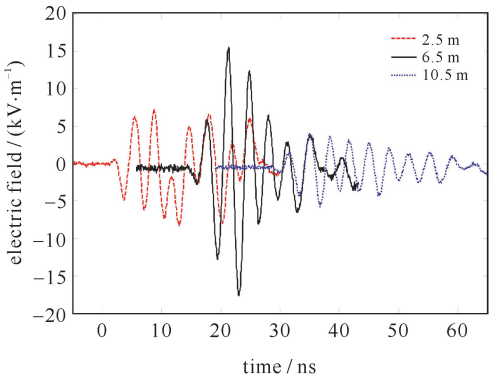


(b) illustration of the radiation system

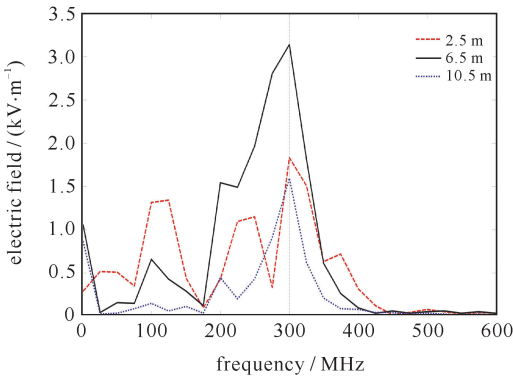
Fig. 10 High power mesoband radiation system based on differential switched oscillator

图 10 基于差分开关振荡器的高功率宽带电磁脉冲辐射系统

在充气气压 1.5 MPa, 辐射距离 2.5 m, 6.5 m, 10.5 m 处辐射场竖直方向分量波形如图 11 所示。三个位置都能测出中心频率约 300 MHz 的正弦衰减振荡波。辐射距离 2.5 m 处, 属于系统的近场区。这个位置的辐射场并不是椭圆极化的 TEM 波, 辐射场竖直方向分量幅值较小。随着距离的增加, 在 6.5 m 处, 辐射场幅值



(a) radiated electric field waveform at different distances



(b) spectrum of the radiated electric field at different distances

Fig. 11 Waveform of the radiated electric field at different distances

图 11 不同距离处辐射场波形

变大,约18 kV/m,衰减振荡更明显,中心频率分量更多,百分比带宽约 20%。在10.5 m处,由于辐射距离的增加,辐射场竖直方向分量幅值变小,中心频率分量减少。

不同距离处有效电势如图 12 所示,当辐射距离大于 7 m 时,有效电势达到 110 kV,且基本不随距离变化。

在辐射距离 10.5 m,不同充气气压下,系统辐射波形如图 13 所示。充气气压 0.1~1.5 MPa 下,辐射系统都能够产生中心频率 300 MHz 的衰减振荡波。开关振荡器内部的火花间隙开关,随着充气气压的提高,其击穿电压会提高,开关导通时间减小,所产生信号的高频分量会增加。因此,输出信号的幅值会增大,中心频率分量增多。

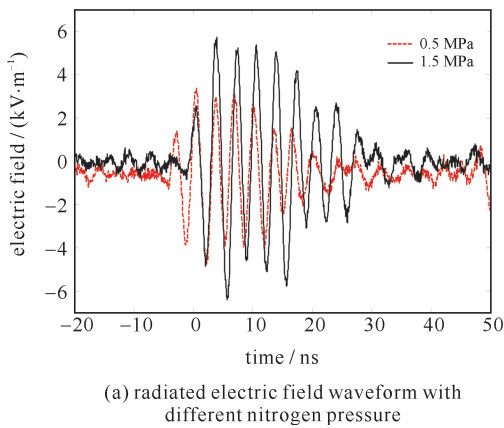


Fig. 13 Waveform of the radiated electric field with different nitrogen pressure

图 13 不同充气气压下辐射场波形

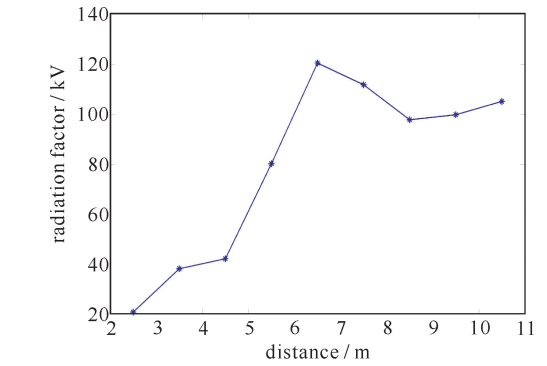
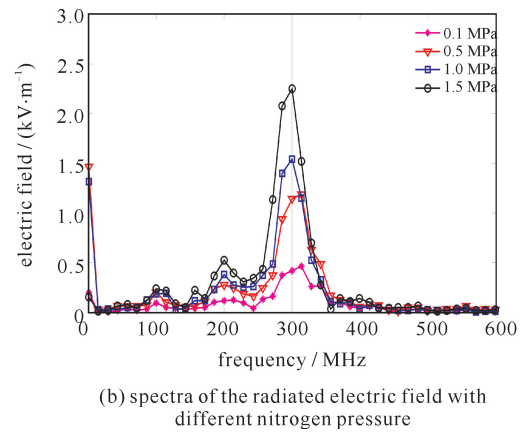


Fig. 12 Radiation factor of the system at different distance

图 12 不同距离处的有效电势



(b) spectra of the radiated electric field with different nitrogen pressure

4 差分型系统与单端型系统实验结果对比

将差分型辐射系统改为单端型辐射系统(如图 14 所示)。该单端型辐射系统的尺寸、中心频率、特征阻抗等参数与差分型辐射系统是一致的,单端开关振荡器的耐压是差分开关振荡器的一半。

当充气气压同为 1.5 MPa,辐射距离同为 10.5 m 时,差分型辐射系统与单端型辐射系统的辐射波形如图 15 所示。单端型辐射系统和差分型辐射系统都能够产生中心频率约 300 MHz 的衰减振荡波,且辐射波形相似。相较于单端型,差分型辐射系统辐射电场峰值近似提高了一倍,频谱图下中心频率分量也近似提高了一倍,衰减振荡更加明显。

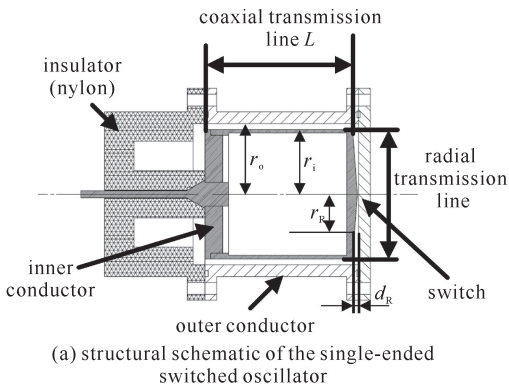
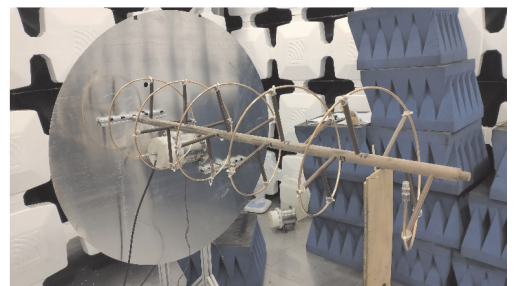
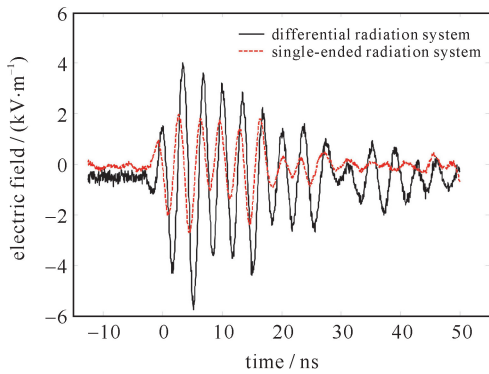


Fig. 14 Radiation system based on single-ended switched oscillator

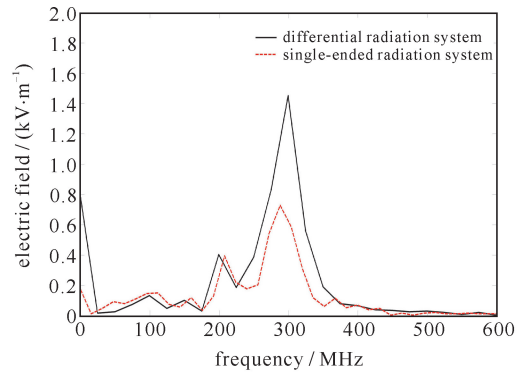
图 14 单端型辐射系统



(b) illustration of the radiation system based on single-ended switched oscillator



(a) radiated electric field waveforms of differential and single-ended radiation systems



(b) spectra of the radiated electric field of differential and single-ended radiation systems

Fig. 15 Waveform of the radiated electric field of differential and single-ended radiation system

图 15 差分型与单端型系统的辐射波形

5 结 论

本文成功研制出一种差分开关振荡器,其充气气压 1.5 MPa,能够产生中心频率 300 MHz 的差分衰减振荡信号。根据差分开关振荡器的输出形式,设计了一种差分注入的螺旋天线,作为辐射天线。基于上述差分开关振荡器和螺旋天线,研制了一种高功率宽带电磁脉冲辐射系统。实验结果表明,该辐射系统能够产生中心频率 300 MHz,百分比带宽约 20% 的高功率宽带电磁脉冲,最大辐射场强约 18 kV/m,有效电势约 110 kV。与单端型辐射系统相比,这种差分型辐射系统的辐射场强近似提高了一倍。

参考文献:

- [1] Prather W D, Sabath F, Baum C E, et al. Survey of worldwide high-power wideband capabilities[J]. IEEE Trans Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3): 335-344.
- [2] Baum C E. Antennas for the switched-oscillator source[R]. Sensor and Simulation Note 455, 2001.
- [3] Baum C E. Switched oscillators[R]. Circuit and Electromagnetic System Design Note 45, 2000.
- [4] Wang Yuwei, Chen Dongqun, Zhang Jiande, et al. Investigation of a compact coaxially fed switched oscillator[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84: 094705.
- [5] Armanious M M H. Design and analysis of a high power moderate band radiator using a switched oscillator[M]. Tucson: University of Arizona, 2010.
- [6] Baum C E. Differential switched oscillators and associated antennas[R]. Sensor and Simulation Note 457, 2001.
- [7] Baum C E. Differential switched oscillators and associated antennas: Part 2[C]// Ultrawideband & Ultrashort Impulse Signals, Second International Workshop. 2004.
- [8] Giri D V, Tesche F M, Abdalla M D, et al. Switched oscillators and their integration into helical antennas[J]. IEEE Trans Plasma Science, 2010, 38(6): 1411-1426.
- [9] 王俞卫,陈冬群,张建德,等. 一种油介质开关振荡器研究[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 053006. (Wang Yuwei, Chen Dongqun, Zhang Jiande, et al. Investigation of a switched oscillator filled with oil. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 053006)
- [10] 王俞卫,陈冬群,张建德,等. 天线阻抗特性对开关振荡器输出脉冲的影响[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(7): 1736-1740. (Wang Yuwei, Chen Dongqun, Zhang Jiande, et al. Influences of impedance characteristics of radiating antenna on output pulse of switched oscillators. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(7): 1736-1740)
- [11] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2015: 16, 516. (Zhong Shunshi. Antenna Theory and Techniques. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 16, 516)
- [12] 李丹. 基于开关振荡器的宽带电磁脉冲发生器[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010. (Li Dan. The wideband electromagnetic pulse generator based on switch oscillator. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2010)
- [13] Vega F, Rachidi F, Mora N, et al. Design and optimization of mesoband radiators using chain parameters[C]//International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). 2011: 1310-1313.
- [14] 江宏球,杨兰均,关锦清,等. 开关振荡器特性阻抗选取对输出波形影响[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 055006. (Jiang Hongqiu, Yang Lanjun, Guan Jinjing, et al. Influence of characteristic impedance selection of switching oscillator on output waveform. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 055006)