

文章编号:1000-582X(2010)07-029-07

高强度皮秒电场脉冲无创治疗肿瘤天线设计

姚陈果,龙再全,孙才新,米彦,李成祥

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:高强度电场脉冲的脉宽从纳秒级减小到亚纳秒级甚至皮秒级宽度,将使得电场脉冲对生物体结构和功能的影响研究进入新的领域。根据椭球的几何特性,提出一种由椭球面反射器和单圆锥辐射器组成的冲激脉冲辐射聚焦天线,天线可以把高强度皮秒级电场脉冲无创伤地传输至浅层生物组织处。通过高强度电场脉冲的作用来诱导肿瘤细胞凋亡并起到杀伤作用,从而实现肿瘤的无创治疗。仿真结果表明超短时电场脉冲在靶点位置能形成有效的聚焦,并具有很高的幅值,增益和电场方向图在频带内变化稳定,同时,天线性能指标电压驻波比小于 2,反射损耗小于 -10 dB,满足超宽带时域天线的设计要求。

关键词:电场脉冲;冲激脉冲辐射天线;聚焦;无创治疗

中图分类号: TM836;Q64

文献标志码: A

Antenna design for non-invasive tumor treatment with high-intensity picosecond electric pulse

YAO Chen-guo, LONG Zai-quan, SUN Cai-xin, MI Yan, LI Cheng-xiang

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,
Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: By reducing the pulse width of high intensity electric field from nanosecond to sub-nanosecond or picosecond level, it will lead the research of pulses on the structure and function of organisms to a new field. Based on the geometry characteristics of ellipsoid, an Impulse Radiating Antenna composed of an ellipsoidal reflector and a cone radiator was proposed, which could transform the high-intensity picosecond electric pulses to superficial layer of organisms, then kill tumor cells non-invasively. Simulation analysis shows that the electric field of ultra-short pulses are focusing effectively with high amplitude, while the gain and E-field pattern of the Impulse Radiating Antenna are stable. In addition, the Voltage Standing Wave Ratio is less than 2 and the return loss is less than -10dB, all of which meet the design requirements of ultra-wideband time domain antennas.

Key words: electric pulse; Impulse Radiating Antenna; focusing; non-invasive treatment

世界各地每年有数以百万计的癌症患者死亡,对于一些种类的癌症治疗方法目前已取得相当的进展^[1-4],但是由于缺乏选择性和靶向性,往往在杀死

一个癌细胞的同时,会错杀成千上万的正常细胞,这对患者的生理和心理将产生严重的负面影响。因此,寻找一种更有效、更安全以及更便宜的癌症治疗

收稿日期: 2010-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50637020, 50877083)

作者简介: 姚陈果(1975-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电气设备在线监测与故障诊断技术、生物医学的电工新技术及高电压新技术研究,(Tel)023-65112058;(E-mail)yaochenguo@cqu.edu.cn.

手段一直是医患双方的期盼^[5]。

近年来,时域电磁场特别是超宽带超短脉冲的发射和传播理论不仅在核爆模拟等高新技术领域取得了巨大的成功,而且在超宽带通信等其他民用领域也得到了较广泛的应用^[6-7]。研究发现:皮秒级超短脉冲具有丰富的超宽带频谱(几乎从直流到高达 GHz),因而具有很高的时间分辨率和空间分辨率,信号失真小^[8]。超宽带冲激脉冲辐射天线(Impulse Radiating Antenna, IRA)的提出,将使得作用于生物结构并起到生物治疗作用的高强度电场脉冲脉宽从纳秒级到亚纳秒级,甚至皮秒级^[9]。冲激脉冲辐射天线于 1993 年首次被 Baum 提出并应用于军事研究^[10]。冲激脉冲辐射天线可以在某一特定范围内进行能量传输,将高强度脉冲电磁波汇聚于指定区域,甚至摧毁目标,辐射能量在时间和空间上都很集中。基于这样的特点,冲激脉冲辐射天线技术逐渐在生物电磁学领域开始得到应用。通过冲激脉冲辐射天线将产生的高强度皮秒电场脉冲聚焦于肿瘤组织,使肿瘤细胞线粒体跨膜电位发生变化而崩溃,启动线粒体途径的凋亡靶向诱导,减少对正常细胞的损害和不良反应,从而实现肿瘤的无创治疗。

传统的电极阵列治疗肿瘤组织需要以穿刺的方式把高强度电场脉冲引导至肿瘤处,这在一定程度上限制了该方法的适应症及其临床应用。Altunc 等特殊设计的冲激脉冲辐射天线可以将高强度电场脉冲无创辐射进入生物体表浅层组织,并且能在肿瘤组织部位形成有效的聚焦^[11-12]。这种方式既可以有效地杀死肿瘤细胞,也可以减少对周围正常组织的损害和不良反应。Xiao 等提出了用于生物医学成像的冲激脉冲辐射天线模型,并对高强度超短脉冲辐射天线结构及其在生物体组织中的传播规律进行了初步的仿真研究^[13]。

笔者基于冲激脉冲辐射天线的优异方向性和精确操控性等特点,提出适用于体内浅层肿瘤组织特别是乳腺癌无创治疗的超宽带冲激脉冲辐射聚焦天线。对冲激脉冲辐射聚焦天线结构在近场无生物组织条件下进行了数值仿真,分析了天线的椭球反射面腔内的波过程,并对天线的各种评价指标进行了讨论。目前,利用高强度皮秒电场脉冲靶向诱导肿瘤细胞凋亡并实现肿瘤无创治疗的思路在国内外尚属首次提出,具有重要的研究意义。

1 冲激脉冲辐射聚焦天线原理与结构

在几何光学中,聚焦是一个基本概念,许多年来,相关天线在微波频率聚焦的现象也仅仅是缺乏

实际应用的、纯数学和科学的概念。但是,近几年来,在空间科技领域等方面出现了对于聚焦的应用需要^[14]。

适用于肿瘤无创治疗的冲激脉冲辐射聚焦天线由旋转椭球面反射器与金属平板上的单圆锥辐射器组合而成。旋转椭球面具有 2 个重要的几何特性^[15]:1)由焦点 F_1 发出的光线经椭球面反射后,所有反射光线都汇聚于椭球面的另一焦点 F_2 ;2)由焦点 F_1 发出并经椭球面反射的各条光线,到达椭球面的另一焦点 F_2 时的光程相等,其值为形成该椭球面的椭圆的长轴长 $2a$ 。结合单圆锥辐射器的超宽带辐射特性和旋转椭球面的几何特性,把激励源设置在椭球面的焦点 F_1 处,冲激脉冲辐射聚焦天线可以将从 F_1 处辐射出来并经过椭球面反射的冲激脉冲有效的汇聚于焦点 F_2 处。在实际中,与聚焦天线的整个尺寸相比,入射的电磁波波长并不是无限的短,因此,电磁波在焦点 F_2 的平面上不是聚集于一点,而是一个小区域,称为焦斑。焦斑越小,能量将汇聚得更加集中,焦点处的空间分辨率也越高,能起到的治疗效果将越好。

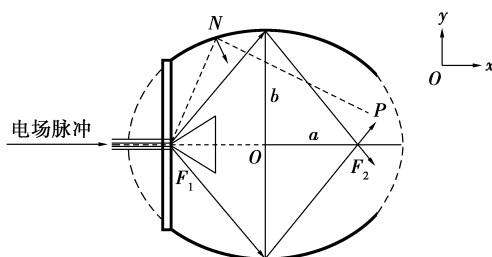


图 1 冲激脉冲辐射聚焦天线原理图

冲激脉冲辐射聚焦天线采用同轴传输线进行馈电,同轴传输线与单圆锥辐射器相连接,其内导体直径与单圆锥辐射器的底部尺寸相等,连接点位于椭球面反射器的焦点 F_1 处。设 N 为椭球面上任一点, γ 为 $N(x_0, y_0, z_0)$ 与 x 轴正向的夹角, \hat{n} 为 N 的单位法向量, $P(x_p, y_p, z_p)$ 为电场脉冲经过反射面上 N 点反射后在焦点 F_2 附近的一点,以椭球面中心为原点。如图 1 所示,椭球面绕 x 轴旋转对称,其几何方程为:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2 + z^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

式中: a 为长半轴, b 为短半轴。椭球面上任一点 N 的单位法向量为:

$$\hat{n} = -(\hat{x}a^2x_0 + \hat{y}b^2y_0 + \hat{z}b^2z_0). \quad (2)$$

N 点到 P 点的矢径为:

$$r = r_p - r_0 = \hat{x}(x_p - x_0) + \hat{y}(y_p - y_0) + \hat{z}(z_p - z_0) \quad (3)$$

同轴馈源辐射的电磁波沿圆锥面投射到椭球内表面,在其上感应面电流,椭球面内表面的每一面元,都成为辐射单元。在矢量球坐标系下,假设馈源的辐射场为:

$$E_i = \hat{\theta}E_\theta + \hat{\phi}E_\phi \quad (4)$$

则椭球面上的感应电流为:

$$J = 2\hat{n} \times H_i = 2\hat{n} \times (k \times E_i / \eta) \quad (5)$$

$$E = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \iint_s [J - (J \cdot \hat{r})\hat{r}] \frac{e^{-jkr}}{r} ds \quad (6)$$

把式(1)-(5)代入到简化的朱兰成辐射公式(6),即可求得焦点 F_2 附近的电场分布^[16]。当 P 点位于焦点 F_2 处时,则可以求得焦点 F_2 处的场分布。

2 天线中的波过程

基于时域有限积分方法对冲激脉冲辐射聚焦天线的电磁暂态过程进行数值仿真分析,椭球面的长半轴 $a = 125 \text{ mm}$,短半轴 $b = 100 \text{ mm}$,焦距 F 为 75 mm 。由于冲激脉冲辐射聚焦天线属于超宽带时域天线范畴,天线模型为旋转对称结构,故在时域中仿真时边界条件只涉及模型机构的对称条件设置,即边界设置取其 $1/4$ 部分进行计算,可以节省大量计算时间。而对于脉冲激励源的选择,由于实验平台中设计的脉冲发生器输出波形接近双指数变化规律,故数值仿真过程中激励源采用单位双指数脉冲形式,其表达式如下:

$$V(t) = V_0 f(t) \quad (7)$$

式中: $f(t) = [e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}] \cdot u(t)$, $\alpha \geq \beta \geq 0$, $u(t)$ 为单位阶跃函数。

椭球反射面腔内填充耦合介质水,其介电常数为 81 ,不计其电导率和损耗率,目的是为了压缩电磁波波波长,并能有效地提高空间和时间分辨率。在考虑生物组织的条件下,由于生物组织中很大一部分为水,故耦合介质的填充也可以减小冲激脉冲辐射天线与生物组织之间匹配不当所引起的反射。皮秒电场脉冲在圆锥辐射器底部连接处以 TEM 球面波形式沿圆锥表面向外进行辐射,其幅值按 $1/r$ 规律衰减。球面波到达圆锥顶部边缘将出现新的衍射,即圆锥边缘成为新的辐射源继续进行辐射。根据电场脉冲在数值仿真中的整个传播过程,截取了 2 个时间点的波形截面图,如图 2 所示。可以看出,冲激脉冲辐射聚焦天线内部激励脉冲从焦点 F_1 辐射出来后,经过椭球面反射后在焦点 F_2 处形成了聚焦。根据截面图简要分析可以得到椭球反射面内含

有 3 种形式的脉冲波,分别为冲激脉冲 w_1 、衍射脉冲 w_2 和重叠脉冲 w_3 。

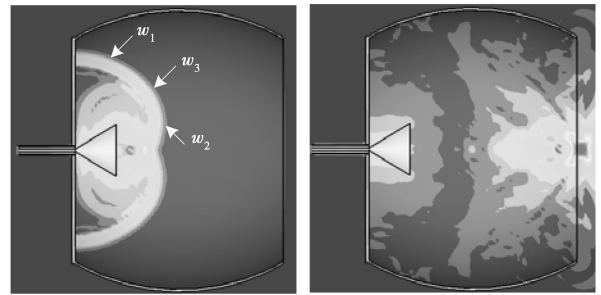


图 2 波形式及聚焦效果图

1) 冲激脉冲 w_1 。该脉冲是原始的没有任何畸变的激励源。由于椭球面反射器的几何特性,电场脉冲波沿不同角度的路径分别传播,具有不同时延的脉冲均可以得到很好的时延补偿,使得电场脉冲到达聚焦点 F_2 处的时间同步,从而能够形成有效的聚焦。

2) 圆锥辐射器顶部边缘衍射产生的脉冲 w_2 。衍射波也是以球状波形式向外进行辐射,一部分向自由空间传播,一部分沿圆锥辐射器表面反射进入同轴馈线端。衍射脉冲 w_2 的波前位置距离 F_2 较冲激脉冲 w_1 的要近,因此,在相同的耦合介质中传输,衍射脉冲 w_2 将会先到达 F_2 点,且在椭球面旋转轴线上形成一定的轴向电场分布,如图 3 所示。衍射脉冲 w_2 经椭球面反射后不会在 F_2 点形成聚焦,但会对 w_1 产生一定的畸变影响。

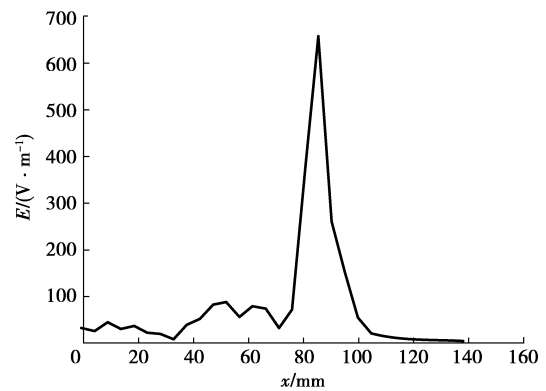


图 3 冲激脉冲辐射聚焦天线 x 轴向电场分布

3) 重叠脉冲 w_3 。由冲激脉冲 w_1 与衍射脉冲 w_2 的叠加产生,其经椭球面反射后也能汇聚于 F_2 处,能起到增强 F_2 处电场的作用。

在同轴传输线内选择一个参考面 MM' ,考察天线结构在此参考面上产生的反射电压(随时间的变化关系),由此判断天线结构所产生的反射,如图 4

所示。

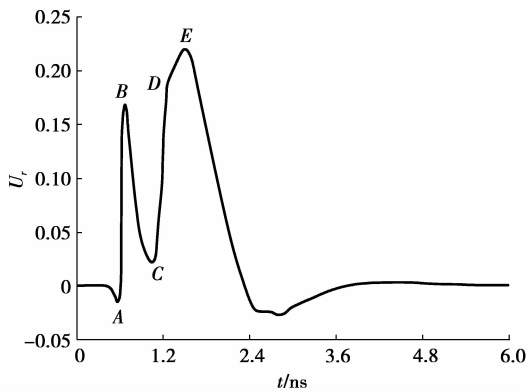


图 4 同轴传输线内的反射电压

图中 A 点小负峰值是由于锥体底部与同轴线上导体连接处张角为 $\pi - \theta$ (θ 为圆锥辐射器的半张角) 的角顶所引起的反射。第 1 个正峰值 B 是由于同轴线口径处的不连续引起的反射, 若在该处连接一个理想导体小匹配环, 可减小该处反射。C 点处表示波沿圆锥表面辐射时在参考面所产生的反射, 对圆锥进行加载可以减小反射, 提高天线辐射的能力。第 2 个正峰值顶部的转折点 D 是锥体上底面张角为 $\pi/2 - \theta$ 的角顶所引起的反射。DE 之间的折线对应波沿圆锥辐射器顶部直径传播的时间。作为对比, 文献[17]给出了实验值。

3 天线的评价指标

研究中冲激脉冲辐射聚焦天线所辐射的是脉宽为亚纳秒级甚至皮秒级的超短时电场脉冲, 脉冲具有极宽的带宽(频率范围从 0 Hz 一直延伸到几百 GHz), 当分数带宽 η 大于 25% 时即属于超宽带范畴。天线是一种导行波与自由空间波之间的换能器, 一定形状的短脉冲从信号源产生并馈入天线后, 要求天线能无失真地将脉冲波形辐射出去。频带内任何一个频率的失真都将导致发射脉冲的形状失真。因此超宽带冲激脉冲辐射聚焦天线应具备的特征是: 辐射脉冲应保持激励信号形状, 脉冲失真小, 且天线输入端反射信号要小, 以及在一定方向上辐射脉冲的效率应尽可能地高。

3.1 电压驻波比与反射损耗

电压驻波比 (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR) 表示馈线端与负载的匹配程度, 理想比例为 1:1, 即天线输入阻抗等于馈线的特性阻抗, 但这种情况很难满足。驻波比越大, 由于不匹配所造成的反射功率越高, 其转换成另一项射频参数为 S_{11} , 这

项参数称为反射损耗, 与 VSWR 表达同样的意义。分别对圆锥半张角 θ 为 30° 和 35° 的冲激脉冲辐射聚焦天线进行分析, 选用这两种角度的依据为: 前期对不同圆锥半张角 θ 仿真研究发现, 在圆锥的这 2 种角度下, 冲激脉冲辐射聚焦天线在焦点 F_2 处能够有最大的电场分布。

结果显示, 2 种参数的天线都能够覆盖 3.1~10.6 GHz 频段, 如图 5 所示, 且电压驻波比在这个频段范围内小于 2, 变化稳定, 能保证输入信号尽可能多地被天线吸收。同时, 反射损耗随频率的波动小于 -10 dB, 变化幅度不大, 满足超宽带天线的设计要求。

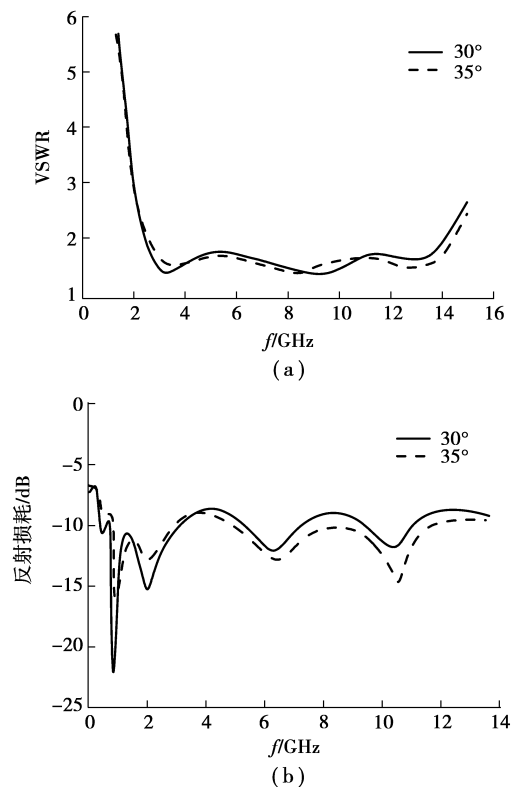


图 5 电压驻波比和反射损耗

3.2 增益

冲激脉冲辐射聚焦天线的增益 (Gain) 可以定量地描述天线把输入功率集中辐射的程度。研究中使用金属挡板人为地对冲激脉冲辐射聚焦天线辐射方向进行了改变, 因而增益与天线的方向图也有密切的关系。超宽带天线的增益是频率的函数, 由于天线不可能是理想的全向辐射, 因此不同辐射方向的增益会有所不同。

在设计频带内设置不同的频点, 观察各个频点天线的增益值。结果显示, 2 种结构参数的天线增

益在设计工作频段内随频率变化稳定,保持在 6.5 dB左右,如图 6 所示。

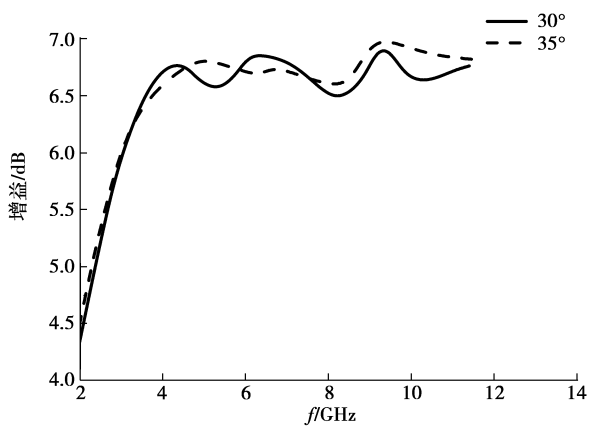


图 6 天线增益

3.3 电场方向图

冲激脉冲辐射聚焦天线的辐射方向图描述的是天线辐射特性随着空间方向坐标的变化关系图形,一般有辐射强度、场强、相位和极化等方向图。笔者对电场强度方向图进行了分析,分别选取了带宽内 3.6、5.0、7.5、10.6 GHz 4 个频点进行分析,以此得到天线场方向图在整个工作频带内的变化趋势。

金属挡板对天线的电场方向图起了一定的控制作用,因此馈电端的辐射将受到削弱。分析可知天线的电场方向图应具有一定的方向性,而不是整个的全向辐射。结果显示,天线的场方向图在 4 个频点处具有相似的稳定变化趋势,并且具有一定的定向性,与理论分析吻合,如图 7 所示。因此,可以得出,设计的冲激脉冲辐射聚焦天线的电场方向图在工作频带内变化稳定。

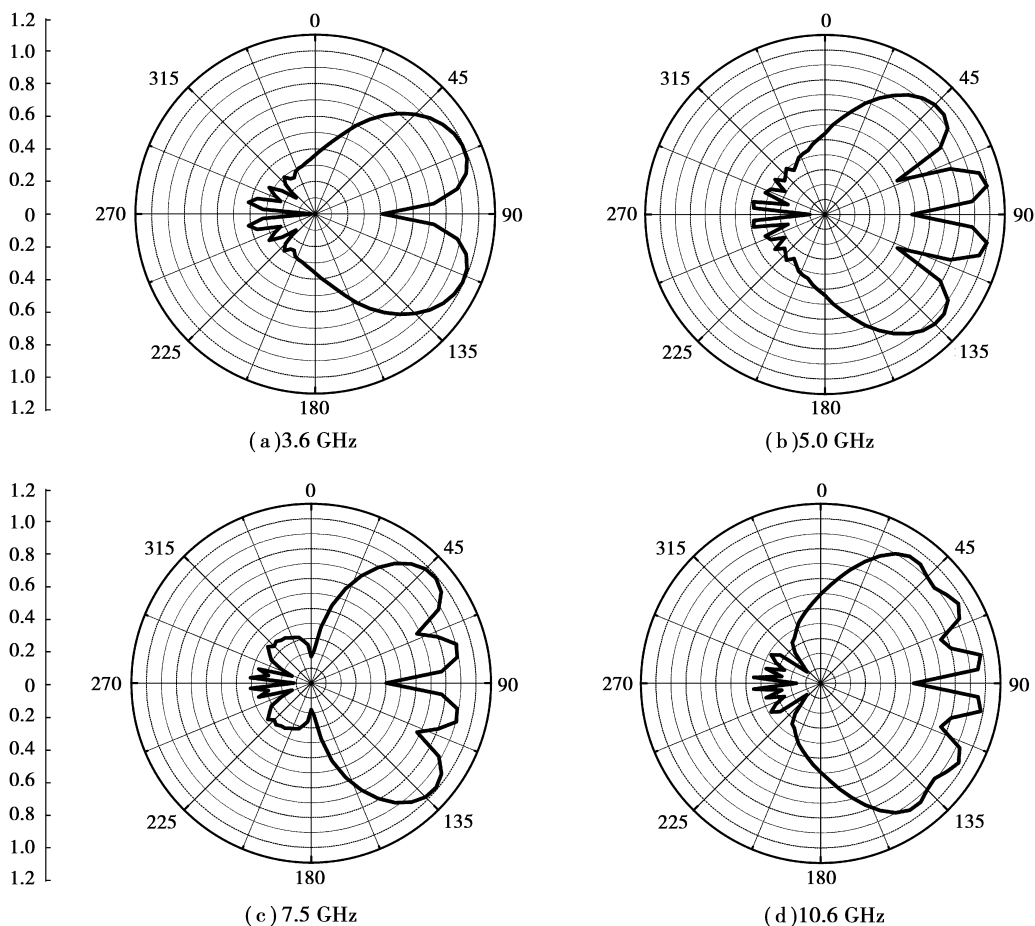


图 7 天线电场方向图

3.4 自定义指标

对于冲激脉冲辐射聚焦天线的设计,除了考虑常规性能评价指标外,笔者还针对无创治疗应用提出了 2 种特殊评价指标:焦点 F_2 处的电压时间分辨

率和电场空间分辨率。

时间分辨率主要是用于衡量冲激脉冲辐射聚焦天线在 F_2 汇聚的电压是否能保持输入皮秒电场脉冲的冲激特性。研究发现,焦点 F_2 处所形成的脉冲

具有非常陡峭的上升沿,且半峰带宽维持在皮秒级。偏离焦点的脉冲幅值呈减小趋势,偏离越远,畸变的程度越大。空间分辨率是为了衡量天线在焦点 F_2 处产生的高强度电场脉冲半峰带宽占有的空间尺寸(焦斑),尺寸越小,则冲激特性越明显。通过对天线的结构进行不断地优化,可以保证空间分辨率在 y 方向和 z 方向在 10 mm 以内, x 方向为 15 mm 以内,如图 8 所示。

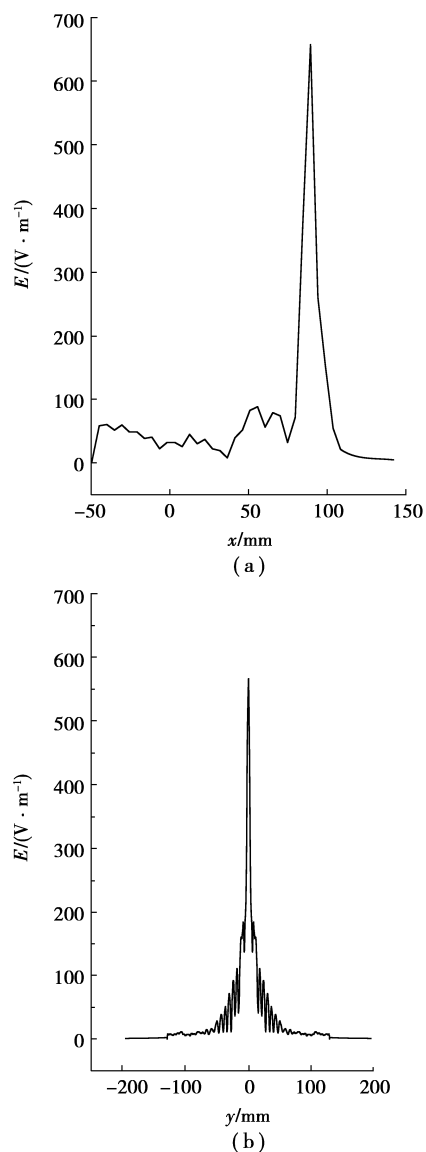


图 8 焦点 F_2 附近的轴向和横向的电场空间分辨率

4 结 论

1)设计了一种用于生物医学无创治疗体内浅层肿瘤组织特别是乳腺癌的冲激脉冲辐射聚焦天线。天线由旋转椭球面与金属平板上的单圆锥辐射器组合而成。皮秒电场脉冲从椭球面的第 1 个焦点 F_1

向外辐射,经过椭球面反射能在第 2 个焦点 F_2 形成有效的聚焦。

2)对冲激脉冲辐射聚焦天线的常规性能评价指标进行了分析。数值仿真结果显示天线的电压驻波比小于 2,反射损耗小于 -10 dB,能有效地辐射皮秒电场脉冲。增益和电场方向图在超宽带设计带宽内随频率变化稳定。同时,提出了自定义评价指标:焦点 F_2 处的电压时间分辨率和电场空间分辨率。

笔者的研究建立在聚焦区无生物组织的基础之上,通过有限积分数值仿真对天线结构本身及其评价指标做了一定的分析,而对于超短时皮秒电场脉冲诱导肿瘤细胞凋亡的作用机理及其在正常与肿瘤生物组织中的传播规律,以及超宽带冲激脉冲辐射聚焦天线的无创聚焦机制等并未进行考虑,这方面还需要更加深入的理论和实验研究。

参考文献:

- [1] SCHOENBACH KH, XIAO S, JOSHI RP, et al. The effect of intense subnanosecond electrical pulses on biological cells[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 36(2):414-422.
- [2] SCHOENBACH KH, HARGRAVE B, JOSHI R P, et al. Bioelectric effects of intense nanosecond pulses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(5):1088-1109.
- [3] 姚陈果,孙才新,米彦,等. 陡脉冲不可逆性电击穿治疗肿瘤的研究[J]. 高电压技术,2007,33(2): 7-13.
YAO CHEN-GUO, SUN CAI-XIN, MI YAN, et al. Progress in research of irreversible electrical breakdown of steep pulse for tumor treatment and its key techniques [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(2): 7-13.
- [4] 米彦,孙才新,姚陈果,等. 基于等效电路模型的细胞内外膜跨膜电位频率响应[J]. 电工技术学报,2007, 22(6):6-11.
MI YAN, SUN CAI-XIN, YAO CHEN-GUO, et al. Frequency response of transmembrane potential on cell inner and outer membrane based on equivalent circuit model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(6):6-11.
- [5] SCHOENBACH K H, JOSHI R P, KOLB J F, et al. Ultrashort electrical pulses open a new gateway into biological cells[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(7): 1122-1137.
- [6] 阮成礼. 超宽带天线理论与技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006.

(下转第 57 页)

- herringbone gears pair [C] // Proceedings of the International Conference on Mechanical Transmissions, Sep. 26-30, 2006, Chongqing, China. Chongqing, China: Science Press, 2006: 134-139.
- [14] MLYOSHI Y, TOBISAWA K, SAIKI K. Composite analysis method of tooth contact load distribution of helical gear [C] // 2007 ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Sep. 4-7 2007, Las Vegas, NV, United States. Las Vegas, NV, United States: ASME, 2008: 173-180.
- [15] 朱孝录, 鄂中凯. 齿轮承载能力分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 143-170.
- [16] 刘辉, 吴昌林, 杨叔子. 基于有限元法的斜齿轮体模态计算与分析[J]. 华中理工大学学报, 1998, 26(11): 75-77.
- LIU HUI, WU CHANG-LIN, YANG SHU-ZI. Calculation and Analysis of a mode for helical gear based on FEM[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1998, 26(11): 75-77.

(编辑 王维朗)

~~~~~

(上接第34页)

- [7] 葛利嘉, 曾凡鑫. 超宽带无线通信[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [8] BAUM C E, STONE A P, TYO J S. Ultra-wideband, short-pulse electromagnetics 8 [M]. [S. l.]: Springer Press, 2007.
- [9] SCHOENBACH K H, NUCCITELLI R, BEEBE S J. Zap [J]. IEEE Spectrum, 2006, 43(8): 20-28.
- [10] BAUM C E, FARR E G. Impulse radiating antennas. Ultra-wideband, short-pulse electromagnetics[M]. [S. l.]: Springer Press, 1993.
- [11] ALTUNC S, BAUM C E, CHRISTODOULOU C E. et al. Focal waveforms for various source waveforms driving a prolate-spheroidal impulse radiating antenna [J]. Radio Science, 2008, 43(4): 327-335.
- [12] BAUM C E. Focal waveform of a prolate-spheroidal impulse-radiating antenna (IRA) [J]. Radio Science, 2007, 42(6): 27-36.
- [13] XIAO S, MIGLIACCIO M A, CAMP J T, et al. A wide-band focusing system for bioelectric applications [C] // 16th International Pulsed Power Conference Proceeding, June 17-22, 2007, Albuquerque, NM. [S. l.]: IEEE, 2007: 105-110.
- [14] 邓扬建, 林为干, 赵愉深. 聚焦口径轴向电磁能的研究 [J]. 电子科技大学学报, 1994, 23(6): 595-601.
- DENG YANG-JIAN, LIN WEI-GAN, ZHAO YU-SHEN. Axial electromagnetic energy from focused apertures [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1994, 23(6): 595-601.
- [15] 肖辰飞, 吕善伟, 吴东梅, 等. 椭球反射面聚焦天线的设计和仿真[J]. 电子测量技术, 2006, 29(5): 21-23.
- XIAO CHEN-FEI, LV SHAN-WEI, WU DONG-MEI, et al. Design and simulation of elliptical reflector antenna [J]. Electronic Measurement Technology, 2006, 29(5): 21-23.
- [16] 杨可忠. 现代面天线新技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1993.
- [17] MALONEY J G, SMITH G S. Optimization of a conical antenna for pulse radiation: An efficient design using resistive loading [J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 1993, 41(7): 940-947.

(编辑 王维朗)