技术与方法 文章编号:0253-3626(2010)09-1381-03

相控阵多焦点声场模式合并大焦域方法

向 军,王 华,曾德平,李悦新,陈 伟,钟珊珊
(重庆医科大学生物医学工程系、超声医学工程重庆市市级重点实验室,重庆 400016)

【摘 要】目的:目前用于聚焦超声外科手术的球面换能器生成的焦斑体积非常小,因此需要很长的治疗时间来完成对大肿瘤的治疗,为了很好的解决这一问题本文利用多焦点的声场分布合成大焦域形成较大的治疗热场。方法:利用 MATLAB 7.0 计算软件自带的遗传算法工具箱'gads'对相控阵超声换能器进行多焦点模式优化研究。在三焦点、五焦点模式下改变焦点之间的距离,使之形成大焦域声场模式。结果:在缩短焦点之间的距离后,孤立的三焦点声场变成了连续的线声场;五焦点声场变成了蝴蝶状声场,并最终趋于圆形焦域形态。结论:合理的改变焦点个数以及焦点之间间距的大小,可以有效地将多焦点合成大焦域声场模式,为实现 HIFU 快速有效地治疗大面积病灶奠定了理论基础。

【关键词】遗传算法;相控阵;多焦点;大焦域
【中国图书分类法分类号】0426.2 【文献标识码】A 【收稿日期】2010-03-09

The method of Phased Array multifocal model of sound field together with large focal field

XIANG Jun, et al
(*Department of Biomedical Engineering, Chongqing Key laboratory of Ultrasound Medical Engineering, Chongqing Medical University*)

【Abstract】*Objective*: Currently, the focal region size of spherical transducers used in the focused ultrasound surgery is very small, when use this kind of transducer treat large tumors need a long time to complete the treatment . In order to solve this problem , this paper present a new way to form a larger treatment thermal field through combinate multi-focus. *Methods*: Using MATLAB 7.0 computing software that comes with the genetic algorithm toolbox 'gads' pairs of phased array ultrasonic transducer optimization of multi-focus mode. In the three focus, five focus mode to change the focus of the distance between the focus and make it a major focal region sound field mode. *Results*: In the shorter the distance between the focus, the isolated focus of the sound field into a three-line continuous sound field; 5 focus on the sound field into a butterfly-shaped sound field, and ultimately tends to form a circular focal region. *Conclusion*: The change in spacing between the focal point of the number and size of the focus, you can effectively focus on preparation of large multi-focal region sound field model for the realization of HIFU to treat large areas quickly and effectively laid the foundation for lesions.

【Key words】GA(Genetic-Algorithm); Phased-Array; Multi-Focus; Large focal region

高强度聚焦超声(High intensity focused ultrasound, HIFU)近年来发展十分迅速,成为医学超声工程界的研究热点。HIFU 治疗的基本原理是利用聚焦超声换能器将超声汇聚于目标靶区,利用超声的热效应、机械效应和空化效应等作用使病变组织发生不可逆的凝固性坏死。球面超声换能器因其高聚焦性和设计简单的特点,常常被用来设计聚焦超声治疗头。但是,高聚焦的球面换能器生成的焦斑体积非常小,因此需要很长的治疗时间来完成对大病灶的治疗[1]。而相控阵技术能动态地进行聚焦发射和聚焦接收,可以同时产生多焦点的声场分布,本方就是在前人的研究基础上对空间声场提出合理的优化目标函数后,利用遗传算法对目标函数进行优化,最终在声场的焦平面上得到了想要的多焦点声场分布[2]。然后改变焦点之间的距离,使多焦点合成大焦域声场模式,形成较大的治疗热场,这就能够很好地解决小焦域治疗时间长的问题。

作者介绍:向 军(1984-),男,硕士,
研究方向:超声仪器。
通信作者:曾德平,女,高级工程师,E-mail:zengdp@haifu.com.cn。
基金项目:国家自然科学基金重点项目(编号:30830040)。

1 多焦点声场控制模式

1.1 超声场共轭直接合成法

超声场多焦点共轭直接合成[3]是通过声场能量分布形式的设定(如设定符合传热特点的多点聚焦模式),然后通过逆

向的方法来求得阵元的驱动信号，这种直接合成法所基于的原始公式是由瑞利积分描述的：

$$P=\frac{i\rho ck}{2\pi}\int_{s} u\frac{e^{-ikr}}{r}ds \qquad (1)$$

其中 $i=\sqrt{-1}$，和分别是介质密度和波速；，是波数；是阵元的表面；是声源表面的质点速度；表示焦点到声源的距离。如果相控阵有个阵元，有个控制点，则复数声压可以写成：

$$P(r_m)=\frac{i\rho ck}{2\pi}\sum_{n=1}^{N}u_n\int_{s_n}\frac{e^{-ik|r_m-r_n'|}}{|r_m-r_n'|}ds_n' \qquad (2)$$

$m=1,2,\cdots,M$ 是声场控制点（焦点）的个数，$n=1,2,\cdots,N$ 代表阵元个数，r_m 表示第 m 控制点的位置，r_n 表示第 n 个阵元（声源点）的位置。根据声场合成理论可以将（2）式写成矩阵形式：

$$H_M u_n=P_M \qquad (3)$$

式中 u_n 是阵元的复数激励向量（驱动向量），$u_n=[u_1,u_2\cdots,u_N]^T$，上标表示向量转置。$P_M$ 是设定的控制点的复数声压 $P_M=[P_M(r_1),P_M(r_2),\cdots,P_M(r_m)]$。$H_M$ 是前向传输算子，用公式表示为：

$$H_m(m,n)=\frac{i\rho ck}{2\pi}\int_{s_n}\frac{e^{-ik|r_m-r_n'|}}{|r_m-r_n'|}ds_n' \qquad (4)$$

结合式（3）和式（4），用逆向法可以求得驱动向量：

$$u_N=H^{*T}_M(H_M H^{*T}_M)^{-1}\ P_M \qquad (5)$$

H^{*T}_M 是 H_M 的共轭转置，P_M 的声压幅值可以任意设定。

1.2 优化目标函数的建立

为了使声场能量有效地聚焦在设定点处，即能量集中在控制点处，控制点以外的能量尽可能的小，就要求激励的平均声能：

$$I_s=\frac{\rho c}{2N}u_n^{*\tau}u_n \qquad (6)$$

最大限度地集中于设定点：

$$I_{PM}=\sum_{i=1}^{M}\frac{P_i^{*\tau}P_i}{2\rho c} \qquad (7)$$

为了满足以上条件，本文将利用最常见的声强增益作为控制声场优化目标函数。声强增益定义如下：

$$G=\frac{P_M^{*\tau}P_M}{u_N^{*\tau}u_N} \qquad (8)$$

在约束条件下，式（8）就变为：

$$G=\frac{P_M^{*\tau}P_M}{P_M^{*\tau}(H_M H_M^{*\tau})^{-1}P_M} \qquad (9)$$

式（8）、（9）中 P_M，u_N，H_M 的含义同 1.1 中所述。要使声场能量有效的聚焦于 P_M 点，从而让 G 取得最大值。那么问题就转换为取什么样的才能使 G 最大的全局寻优问题。

1.3 遗传算法优化超声场多焦点控制模式

遗传算法（Genetic algorithm，GA）是模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰的生物进化过程的计算模型[4]。与传统的单点或单线搜索解的方法不同，遗传算法是在解空间并行搜索，因而可以获得全局最优解。所以空间声场的优化，实际上是全局寻优问题。遗传算法是解决全局最优问题行之有效的方法。首先，我们要设定焦平面上的控制声场点的幅值（即 P_M 的幅值），通过对它们的相位角 $P_M=[|P_M(1)|\exp(i\theta(1)),\cdots,|P_M(M)\exp(i\theta(M))|]$ 中的 $\theta(k)$ 优化来寻求声强增益的最大值（k=1,2,…,M）。遗传算法寻优的目的就是要求不同的 $\theta(k)$ 组合，使适应度函数（即声强增益 G）：

$$Fit=G=\frac{P_M^{*T}P_M}{P_M^{*T}(H_M H_M^{*T})^{-1}P_M} \qquad (10)$$

最大[5]。

本文利用了 matlab7.0 自带的遗传算法工具箱 gads 进行编译。采用了二进制编码，取种群大小为 80，交叉概率为 0.6，变异概率为 0.05，初始搜索点选在（0，2π）之间。设置了最大迭代次数为 200 作为终止条件。在迭代中，反复进行选择、交叉、变异。最后得到适应度最优的个体，并将这一个体译码回去，得到优化的向量，再利用逆向公式（5）得到驱动向量，最后利用求得整个声场控制优化结果。

2 多焦点声场模式遗传算法优化仿真

本文选用相控阵换能器的结构如图 1。阵元采用 20×20 的方形面阵。每个阵元的边长 a=3 mm，阵元中心间距 d=0.5 mm，超声换能器频率 f=1MHZ，声速 c=1 540 m/s，介质密度 ρ=1 000 kg/m³。方形阵元的声压计算公式为：

$$P=\frac{i\rho ca^2}{\lambda}\sum_{N=1}^{N}\frac{u_n}{R}e^{-ikR}\mathrm{sinc}\frac{kx_n'a}{2R}\mathrm{sinc}\frac{ky_n'a}{2R} \qquad (11)$$

$$R=\sqrt{z^2+(x-x_n)^2+(y-y_n)^2}=\sqrt{z^2+x_n'^2+y_n'^2} \qquad (12)$$

本文用遗传算法对图 1 换能器分别作 3 个、5 个焦点的声场优化控制模式仿真，焦平面设在 z=0.1 m 处。焦点能量（即 P_M 的幅值）峰值为 600 w/cm²。

图 2 为利用遗传算法优化得到的三焦点控制模式焦平面的声压分布图，焦点位置位于在（-0.007，0，0.1）、（0，0，0.1）、（0.007，0，0.1）处。

把焦点设在（-0.0035，0，0.1）、（0.0035，0，0.1）、（0，-0.0035，0.1）、（0，0.0035，0.1）、（0，0，0.1）处就可得到图 3 所示的 5 焦点焦平面声压分布图。

由上述仿真图可知遗传算法对焦平面的焦点控制很灵

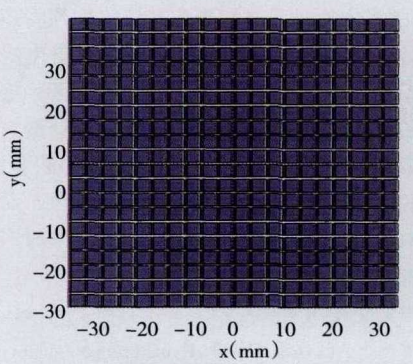


图 1 20×20 阵元超声相控阵换能器结构

活，只要确定焦平面处所要聚焦的点的坐标就可以实现在焦平面处任意点的聚焦。并且焦点处的能量突出、锐度较大、各个焦点的能量分布也比较均匀。

3 多焦点的合并

当用高强度聚焦超声治疗病变组织较大的区域时，为了节约治疗时间，提高效率，我们通常希望增大焦点辐照范围。在此通过适当改变焦点与焦点之间的距离，将焦点进行合并就可达到目的。接下来我们以焦平面 3 焦点和 5 焦点控制模式来说明其实现过程。

图 4 与图 5 分别表示了 3 个控制焦点和 5 个控制焦点随焦点间距的缩小，焦平面上正视图(左)和俯视图(右)的变化趋势。从图 4 焦平面俯视图可以清晰看到，3 个焦点之间的间距从 4 mm 减小到 2 mm 时，焦域从 3 个孤立的点，逐渐变成了一条线。同样在图 5 俯视图中随着周围 4 个焦点与中心焦点间距的缩小，焦域形成蝴蝶状，最终趋于圆形，且焦域周围的声压起伏也有所改善。所以通过缩小焦点之间的间距就可以使多焦点形成类似单点的大焦域，从理论上讲只要大焦域特征能满足 HIFU 治疗的焦域特征就能快速有效地治疗体积较大的肿瘤。

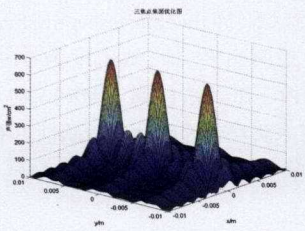


图 2 3 焦点控制模式焦平面分布图

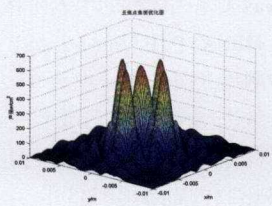
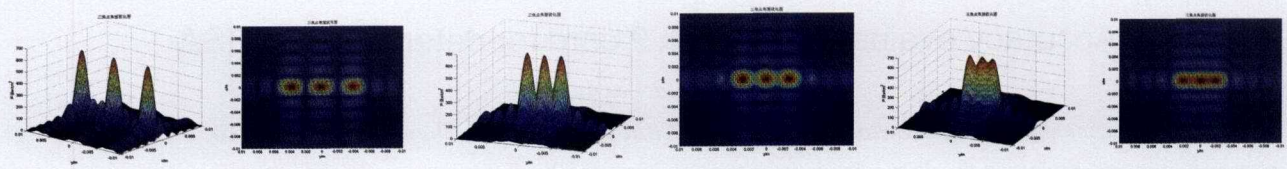
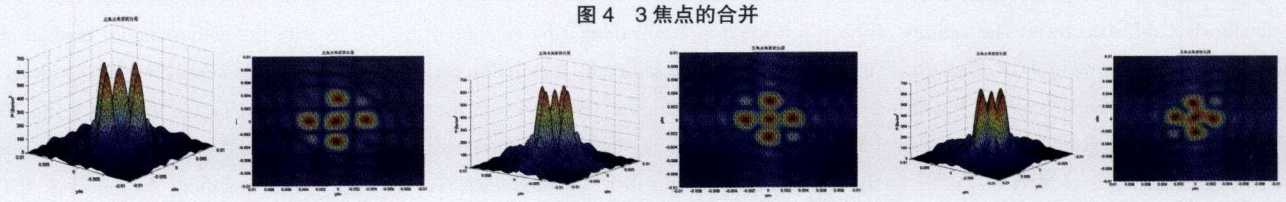


图 3 5 焦点控制模式焦平面分布图



(a)焦点间距为 4 mm　(b) 焦点间距为 3 mm　(c) 焦点间距为 2 mm

图 4 3 焦点的合并



(a) 焦点间距为 4 mm　(b) 焦点间距为 3 mm　(c) 焦点间距为 2 mm

图 5 5 焦点的合并

4 结 论

本文通过实例数值计算验证了遗传算法在超声相控阵模式控制中的有效性，说明遗传算法是优化模式控制中求取全局最优的实用算法。通过该算法，提出一种可以在焦平面上实现大焦域声场模式的简单方法，在 MATALB 仿真环境下验证了此方法的有效性，仿真结果表明多焦点的合并可以实现大焦域声场模式，为实现 HIFU 快速有效地治疗大面积病灶奠定了理论基础。

参 考 文 献

[1] 相控阵聚焦超声消融肿瘤的建模与仿真[J].系统仿真学报，2007，19(1)：164-167.

[2] 王绪飞. 球面矩形阵元相控阵高强度聚焦超声手术的子阵工作模式[J].声学学报，2005，30(5)：473-480.

[3] Ebbini E S，Ibbini M S，Cain C A.An inverse method for hyperthermia phased-array pattern synthesis[J].IEEE Ultrasonics Symposium，1988，38(2)：947-950

[4] Chen G L.Genetic Algorithm and Its Application[M](Peoples Post and Communication Publish Co.，1996.

[5] 陆明珠，万明习，施 雨.相控阵超声热疗场共轭直接合成的模式优化研究[J].物理学报，2001，50(2)：347-353.

(责任编辑：冉明会)