

多焦点超声相控阵控制模式的优化及仿真*

李悦欣¹, 王 华¹, 田立新¹, 许川山²

(1. 重庆师范大学 物理学与信息技术学院, 重庆 400047; 2. 重庆医科大学 第二附属医院, 重庆 400010)

摘 要 :研究高强度聚焦超声热疗场的声场模式, 采用了基于伪逆矩阵的声场合成算法直接形成了多焦点的控制模式, 为焦域控制提供了新思路。利用声场快速算法对 13 × 13 二维面阵的多焦点直接合成声场模式进行计算机仿真, 结果表明了多焦点虽然拓展了焦域大大降低了焦点处的声强, 基于此模式采用遗传算法工具箱优化了多焦点模式的声场增益, 使得声强最大限度的集中在目标体积内; 用遗传算法对声场的模式控制的仿真研究表明, 能达到声场控制模式优化的目标。

关键词 :超声相控阵 遗传算法 优化

中图分类号 :O426. 2

文献标识码 :A

文章编号 :1672-669X(2008)03-0058-04

高强度聚焦超声(High Intensity Focused Ultrasound, HIFU)作为一项无创治疗技术, 已经成为人们研究的热点^[1]。HIFU 中采用的主要聚焦方式有单阵元聚焦和相控阵聚焦^[2]。单阵元聚焦方式控制简单, 需要借助机械扫描进行治疗, 这种治疗方式具有治疗时间长的缺点。近几年来, 一些研究者在 HIFU 中引进了相控阵技术, 通过制阵列换能器各个阵元激励信号的幅值和相位, 产生治疗所需要的聚焦超声波束。由于相控阵换能器焦点位置可变, 焦域大小可调, 并且可实现多焦点聚焦^[3]。这种聚焦方式对于 HIFU 治疗具有很大的优点。因此, 研究如何实现阵列换能器的多焦点聚焦对相控阵列的设计具有重要的理论指导意义^[4]。

目前已经有研究提出将相关的优化目标函数作为空间多点聚焦依据的描述, 要求求出目标函数的最大(或最小)值问题, 实际上是寻求全局最优问题, 本文就是利用遗传算法来研究多阵元超声控制模式优化问题, 并利用数值计算仿真了声场焦平面上的声场分布, 从而验证了遗传算法应用在构造声场优化模式控制算法上的有效性^[5]。

1 多焦点直接合成法与多焦点控制模式优化

1.1 多焦点声压直接合成法

由瑞利积分公式给出^[5]

$$\mu(r) = \frac{i\rho ck}{2\pi} \int_{S'} u(r') \frac{e^{-ik|r-r'|}}{|r-r'|} dS'$$

其中 $i = \sqrt{-1}$, ρ 和 c 分别是介质密度和波速, $k = \frac{\omega}{c}$ 是波数, S' 是阵元的表面, μ 是声源表面的质点速度, r 和 r' 是观察点(焦点)和声源的位置。如果声源是由 N 个阵元组成, 控制点的声压可以写成

$$\mu(r_m) = \frac{i\rho ck}{2\pi} \sum_{n=1}^N u_n \int_{S'_n} \frac{e^{-ik|r_m-r'_n|}}{|r_m-r'_n|} dS'_n$$

其中 $m = 1, 2, \dots, M$ 是声场控制点(焦点)的个数; $n = 1, 2, \dots, N$ 代表阵元个数。

根据声场合成理论 $H_M u_N = P_M \mu$ 是阵元的复数激励向量, $\mu = [u_1, u_2, \dots, u_N]^T$, P_M 是设定的控制点的复数声压, $P_M = [P_M(r_1), P_M(r_2), \dots, P_M(r_m)]$, H_M 是前向传输算子

$$H_M(m, n) = \frac{i\rho ck}{2\pi} \int_{S'_n} \frac{e^{-ik|r_m-r'_n|}}{|r_m-r'_n|} dS'_n$$

用最小二乘法估计 $u_N = H_M^* P_M H_M^*$ 为 H_M 的伪逆。当 $M < N$, H_M 是满秩时, 则用逆向法求得驱动向量为

$$u_N = H_M^{*T} (H_M H_M^{*T})^{-1} P_M \quad (1)$$

H_M^{*T} 是 H_M 的共轭转置。预先设定声场控制点的声压 P_M , 由(1)式可以逆向求得驱动向量 u_N , 声场任意点声压再由

* 收稿日期 2007-12-28 修回日期 2008-04-01

资助项目: 国家高技术研究发展计划(863) No. 2006AA02Z4F0)

作者简介: 李悦欣(1983-)男, 硕士研究生, 研究方向为声光检测和声场模拟。通讯作者: 王华, Email: wantcop@163.com

$$P = H_M u_N \quad (2)$$

得出。

1.2 多焦点的控制模式优化研究

为了使声场能量有效的聚焦在设定点处,控制点以外的能量尽可能的小^[6],就要求激励的平均声能 $I_s = \frac{\rho c}{2N} u_N^{*T} u_N$, 最大限度地集中在设定点

$$I_{P_M} = \frac{P^{*T} P}{2\rho c}$$

本论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

$$G = \frac{P_M^{*T} P_M}{u_N^{*T} u_N} \quad (3)$$

在约束条件 $u_N = H_M^{*T} (H_M H_M^{*T})^{-1} P_M$ 下(3)式变为

$G = \frac{P_M^{*T} P_M}{P_M^{*T} (H_M H_M^{*T})^{-1} P_M}$, 即使 G 取得最大值, 声场能量才能有效的聚焦于 P_M 点。于是问题就转换为取什么样的 P_M 才能使 G 最大的全局寻优问题。

2 遗传算法优化超声场控制模式

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。它是一类借鉴生物自然选择和自然遗传机制, 以一种群体中的所有个体为对象, 并利用随机技术指导对一个被编码的参数空间进行高效搜索的方法。由于其在求解复杂优化问题的巨大潜力及其在工业工程领域的成功应用, 这种算法受到了广泛的关注^[7]。

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^[8]。首先, 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即

$$P_M = [|P_M(1)| \exp(i\alpha(1)), |P_M(2)| \exp(i\alpha(2)), \dots, |P_M(M)| \exp(i\alpha(M))]$$

中的 $\alpha(k)$ $k = 1, 2, \dots, M$, 优化来寻求声强增益的最大值。遗传算法寻优的目的就是要求不同的 $\alpha(k)$ 组合, 使适应度函数(即声强增益 G) $Fit = G =$

$$\frac{P_M^{*T} P_M}{P_M^{*T} (H_M H_M^{*T})^{-1} P_M} \text{最大。}$$

利用 Matlab7.0 自带的遗传算法工具箱 gads 进行编译。采用二进制编码, 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。算法停止前可迭代的最大次数为 100, 在这 100 次迭代中, 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 P_M 向量, 再利用逆向(1)式得到驱动向量 u_N , 最后利用(2)式求得整个声场控制优化结果。

3 声场控制模式的遗传算法优化仿真

本文所选用矩形阵列换能器的结构如图 1。阵元采用 13×13 的矩形面阵。每个阵元的边长 $a = 0.003 \text{ m}$, 阵元中心间距 $d = 0.0005 \text{ m}$, 超声换能器频率 $f = 1 \text{ MHz}$, 声速 $c = 1540 \text{ m/s}$, 介质密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 。矩形阵元的声压为^[9]

$$P = \frac{i\rho c \Delta\omega \Delta h}{\lambda} \sum_{n=1}^N \frac{u_n}{R} e^{-ikR} \text{sinc} \frac{kx'_n \Delta\omega}{2R} \text{sinc} \frac{ky'_n \Delta h}{2R}$$

其中 $\Delta\omega$ Δh 是阵元的宽度和高度 本文取 $\Delta\omega = \Delta h = a$ 。 $R = \sqrt{z^2 + (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2} = \sqrt{z^2 + x_n^2 + y_n^2}$, 用遗传算法分别对 2、4、6 个焦点, 以及花瓣型的声场优化控制模式进行仿真, 焦平面设在 $z = 0.1 \text{ m}$ 处。焦点能量(即 P_M 的幅值)为 600 w/cm^2 。

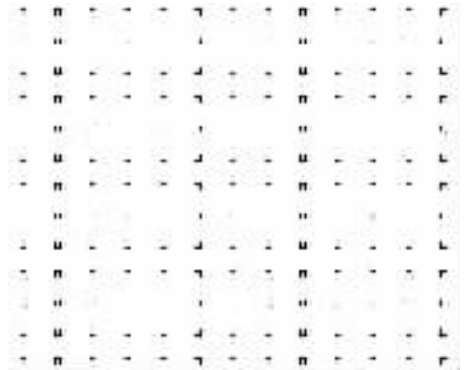
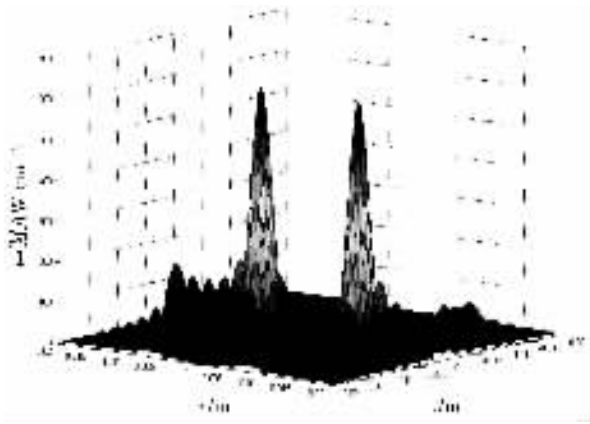
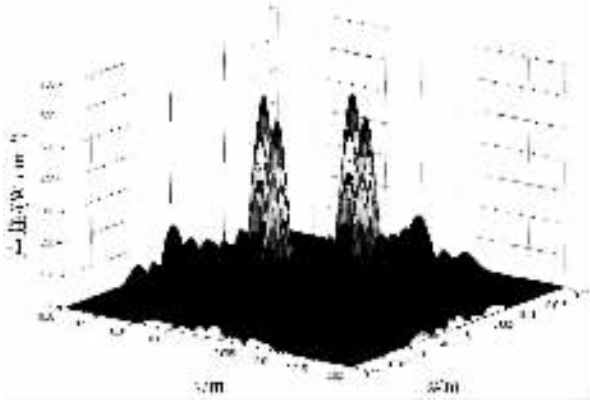
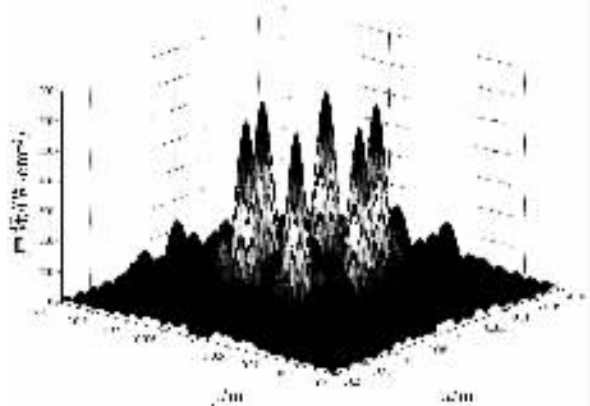


图1 13 × 13 阵元超声相控阵换能器结构

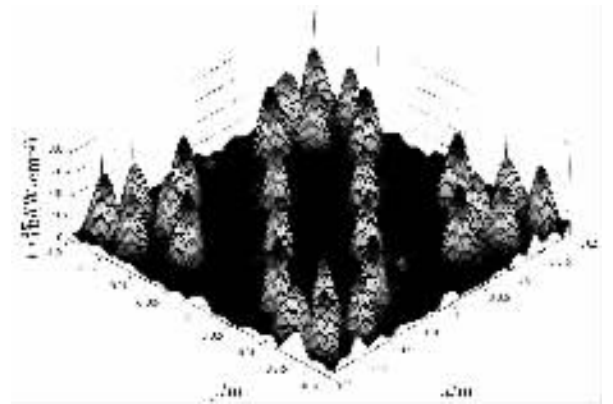
图2 为双焦点控制模式焦点位置在 $(-0.0035, 0, 0.1)$ $(0.0035, 0, 0.1)$ 处的焦平面 $z = 0.1 \text{ m}$ 的声强分布图; 图3 为四焦点控制模式焦点位置在 $(0, 0.0035, 0.1)$ $(-0.0035, 0, 0.1)$ $(0, -0.0035, 0.1)$ $(0.0035, 0, 0.1)$ 处的焦平面 $z = 0.1 \text{ m}$ 的声强分布图; 图4 为六焦点控制模式焦点位置在 $(-0.0035, 0.007, 0.1)$ $(0.0035, 0.007, 0.1)$ $(-0.0035, -0.007, 0.1)$ $(0.0035, -0.007, 0.1)$ $(-0.007, 0, 0.1)$ $(0.007, 0, 0.1)$ 处的焦平面 $z = 0.1 \text{ m}$ 的声强分布图。图5 是为了增大辐射面积, 根据实际情况设计的花瓣型控制模式图。

图2 双焦点控制模式优化 $z = 0.1 \text{ m}$ 图3 四焦点控制模式优化 $z = 0.1 \text{ m}$ 图4 六焦点控制模式优化 $z = 0.1 \text{ m}$

由图2、3、4可以看出焦平面控制点处的能量突出、锐度较大、各个焦点的能量分布均匀。实际上,控制方式是随着实际情况的需要而改变的,有其多样性。

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

图5 花瓣型控制模式优化 $z = 0.1 \text{ m}$

模式控制中求取全局最优的实用算法^[10]。文中基于了声场伪逆算法,利用了声强增益导出了优化函数,使用了遗传算法工具箱对适应度函数进行优化,从而基本解决了对相控阵超声换能器聚焦声场的控制优化这一关键问题。

参考文献:

- [1] KULLERVO H. Review of Ultrasound Therapy[J]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1997, 2: 1305-1313.
- [2] 王绪飞. 球形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] 林成. 聚焦声源声场的有限元研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2007, 24(2): 50-52.
- [4] DAUM D R, HYNYNEN K. Large Scale Phased Array and System for Treatment of Deep Seated Tissue[J]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1998, 2: 1559-1562.
- [5] 陆明珠. 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.
- [6] EBBINI E S, IBBINI M S, CAIN C A. An Inverse Method for Hyperthermia Phased-array Pattern Synthesis[J]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1988, 2: 947-950.
- [7] 雷英杰. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [8] 钟波. 一种基于遗传算法的数据预处理组合方法[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2002, 27(4): 497-500.
- [9] 霍健. 高聚焦超声二维相控阵的声场控制模式研究[J]. 声学学报, 2005, 30(3): 207-214.
- [10] WANG J Q, SONG Q K. A New Criterion for Global Robust Stability of Recurrent Neural Networks with Delay[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2007, 28(1): 33-39.

Design and Optimization of Multiple-focus Ultrasound Phased Array

LI Yue-xin¹, WANG Hua¹, TIAN Li-xin¹, XU Chuan-shan²

(1. College of Physics and Information Technology, Chongqing Normal University, Chongqing 400047 ;

2. The Second Affiliated Hospital, Chongqing Medical University, Chongqing 400010, China)

Abstract :An acoustic field patterns of the High Intensity Focused Ultrasound(HIFU) are studied in this paper. There are many kinds of focusing methods. Electrical focusing is one of them. Comparing with other kinds of focusing ,electrical focusing has a lot of merits , but there are some contradiction conditions in its design. A direct synthesis method of the acoustic field based on the pseudo-inverse matrix can produce the multiple-focus field pattern. It provides a method for controlling acoustic field patterns. The fast algorithm of the acoustic field is used to simulate the multiple-focus field pattern produced by a phased array consisting of 1313 elements. The simulation results show that the 2-D array by using the multiple-focus pattern can produce the foci with lower intensities . Furthermore ,the genetic algorithm is used to optimize the intensity gain of the multiple-focus field patterns. It is shown that HIFU can increase the power deposition in the target volume and eliminate the undesired interference.

Key words ultrasound phased array ;genetic algorithm ;optimize

(责任编辑 欧红叶)
