

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНФИГУРАЦИИ РАЗРЕЖЕННОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ
МАТРИЧНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ
ЦИФРОВОЙ ФОКУСИРОВКИ АНТЕННОЙ**

Долматов Дмитрий Олегович

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: dolmatovdo@tpu.ru

**APPLICATION OF STOCHASTIC OPTIMISATION METHODS FOR DETERMINING
THE CONFIGURATION OF A SPARSE MATRIX PHASED ARRAY FOR ULTRASONIC
IMAGING USING TOTAL FOCUSING METHOD**

Dolmatov Dmitry Olegovich

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk

Аннотация: применение разреженных матричных антенных решеток способно повысить скорость получения трехмерных изображений внутренней структуры объектов при использовании технологии Цифровой фокусировки антенной. При этом применяемая конфигурация разреженного преобразователя определяет качество восстанавливаемых результатов. В данной работе для поиска конфигураций разреженных матричных антенных решеток, обеспечивающих восстановление результатов высокого качества, рассматривается применение методов стохастической оптимизации.

Abstract: application of sparse matrix phased arrays is able to increase the speed of obtaining three-dimensional images of the internal structure of objects when using Total Focusing Method. The applied sparse transducer configuration determines the quality of the restored results. In this paper, the application of stochastic optimization methods is considered to find configurations of sparse matrix phased arrays that ensure the recovery of high quality results.

Ключевые слова: матричные антенные решетки; разреженные преобразователи; технология Цифровой фокусировки антенной; методы стохастической оптимизации; алгоритм имитации отжига.

Keywords: matrix phased array; sparse transducers; Total Focusing Method; stochastic optimization methods; simulated annealing.

Интерес к использованию разреженных антенных решеток в ультразвуковой визуализации обусловлен возможностью повышения скорости получения результатов и снижением требований к используемым блокам ультразвуковой электроники. При этом качество получаемых результатов напрямую зависит от конфигурации применяемого разреженного ультразвукового преобразователя. Для решения задачи поиска такой конфигурации в различных областях применения визуализации с использованием ультразвука активно применяются алгоритмы стохастической оптимизации [1–3]. Значительное внимание использованию разреженных матричных антенных решеток уделено в медицине, где для поиска их конфигураций активно применяется такой метод стохастической оптимизации, как алгоритм имитации отжига [2, 4].

В рамках данной работы рассмотрено применение разреженных матричных антенных решеток для ультразвукового контроля с использованием технологии Цифровой фокусировки антенной (зарубежные аналоги – Total Focusing Method, Sampling Phased Array) [5, 6]. В данном случае поиск конфигурации разреженной матричной антенной решетки с использованием алгоритма имитации отжига заключается в поиске такой конфигурации, функция рассеяния точки (ФРТ) которая будет обладать низким уровнем боковых лепестков и низкой шириной основного лепестка. При этом расчет ФРТ реализуется с использованием выражения, полученного путем адаптации выражения из [7] для трехмерного случая. Пример

рассчитанной ФРТ представлен на рисунке 1. Оценка ширины основного лепестка осуществляется с использованием значения ширины лепестка на половине высоты.

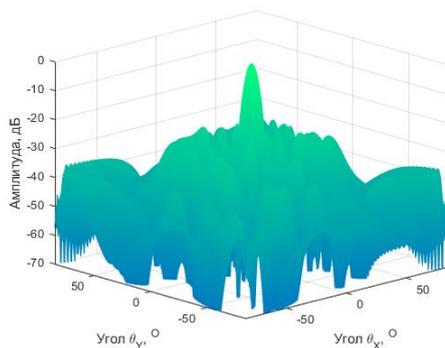


Рисунок 1 – Пример ФРТ

Для решения задачи оптимизации была определена целевая функция, которая основана на использовании параметров ФРТ рассматриваемых конфигураций разреженных матричных антенных решеток. Эффективность работы алгоритма имитации отжига в значительной мере зависит от правильного выбора его параметров, к которым относится начальное и конечное значение температуры, закон изменения этого параметра в процессе выполнения алгоритма. Алгоритм подразумевает реализацию итеративной процедуры, на каждой итерации которого определяются произвольная конфигурация разреженной матричной решетки. На основе параметров ФРТ этой конфигурации принимается решение о принятии указанной конфигурации в качестве текущего решения. Выполнение алгоритма завершается при достижении параметра температуры предельного значения.

Алгоритм поиска оптимальной конфигурации разреженной антенной решетки на основе алгоритма имитации отжига был реализован в программном пакете Matlab. Входными параметрами алгоритма являются условия проведения контроля и требования к конфигурации определяемой разреженной матричной антенной решетки. Указанные параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Начальные параметры для проведения расчетов

| Параметр | Значение |
|--------------------------------------|-------------|
| Количество элементов в АР | 8x8 |
| Рабочая частота элементов АР | 5 МГц |
| Шаг АР | 1 мм |
| Размер одного элемента АР | 0.8x0.8, мм |
| Рассматриваемая среда | Алюминий |
| Количество элементов в конфигурациях | 49, 36, 25 |

При расчетах рассматривался такой режим получения сигналов, при котором зондирование и прием эхо-сигналов осуществлялся только активными элементами конфигурации матричной антенной решетки. Результатом работы алгоритма являются конфигурации разреженных антенных решеток, состоящие из 25, 36 и 49 элементов. Параметры ФРТ полученных конфигураций представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры ФРТ найденных решений

| Конфигурация | ПППВ осн. лепестка, град. | УБЛ, дБ |
|---------------------------|---------------------------|---------|
| Стандартная, 64 элемента | 7.897 | -27.102 |
| Разреженная, 49 элементов | 7.969 | -26.958 |
| Разреженная, 36 элементов | 8.156 | -26.627 |
| Разреженная, 25 элементов | 7.906 | -22.368 |

Таким образом, в полученных конфигурациях разреженной матричной антенной решетки обеспечивается получение ФРТ с шириной основного лепестка близкой к аналогичному параметру стандартной матричной антенной решетки, где все элементы

преобразователя являются активными. Для всех конфигураций разреженных матричных антенных решеток разница относительно стандартной конфигурации не превысила 0.259 градуса. Кроме того, во всех случаях был получен низкий уровень боковых лепестков (значение ниже -20 дБ). На практике разреженные конфигурации с полученными параметрами ФРТ должны обеспечивать восстановление ультразвуковых изображений высокого качества, обладающих высоким разрешением, отношением сигнал/шум и отсутствием ложных бликов, не соответствующих реальным несплошностям в контролируемых изделиях.

Для оценки эффективности решения задачи поиска оптимальных конфигураций разреженных матричных антенных решеток ширина основного лепестка и уровень боковых лепестков найденных конфигураций сравнивались с аналогичными параметрами произвольных конфигураций. Для этой цели были произвольным образом получены по 1000 конфигураций разреженных матричных антенных решеток, состоящих из 25, 36, 49 активных элементов. Параметры ФРТ произвольных конфигураций имели распределение по форме близкое к нормальному. На рисунках 2–4 представлены кумуляты полученных распределений параметров ФРТ разреженных матричных антенных решеток и положение на них параметров ФРТ найденных решений.

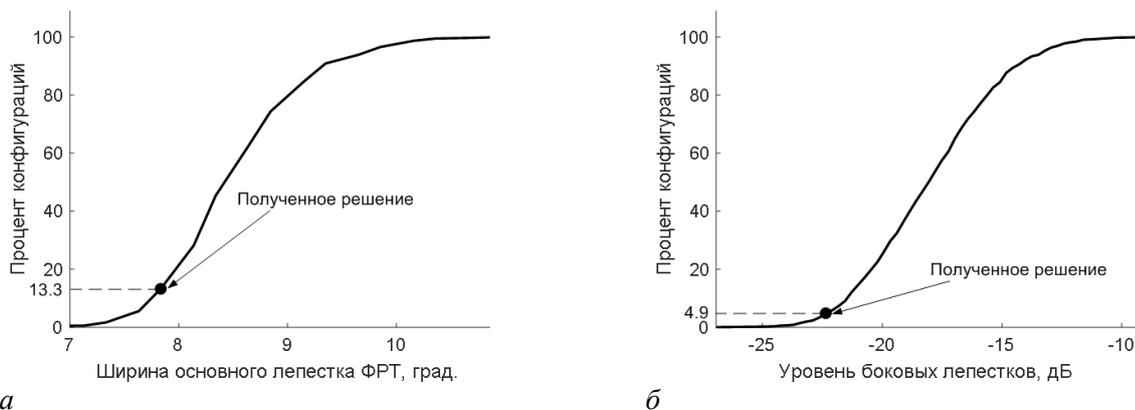


Рисунок 2 – Кумуляты распределения параметров ФРТ разреженных матричных антенных решеток из 25 элементов и положение на них параметров ФРТ найденного решения а – ширина основного лепестка ФРТ; б – уровень боковых лепестков

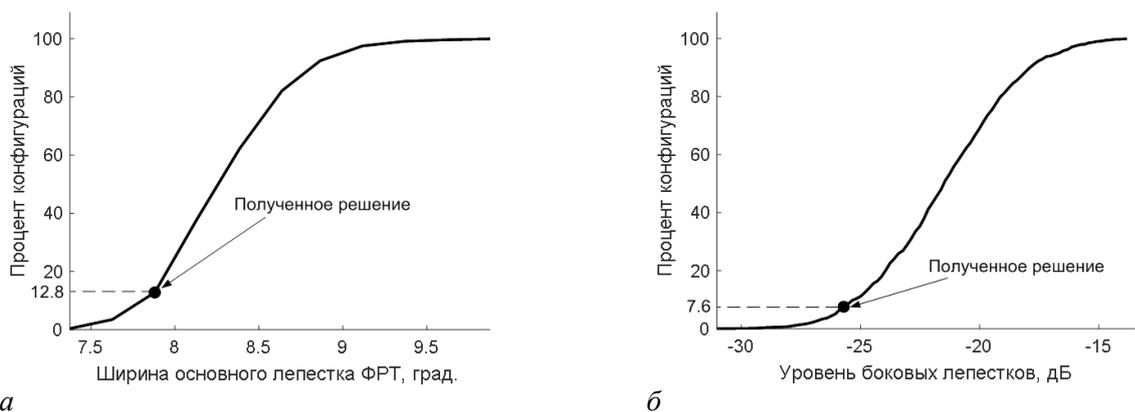
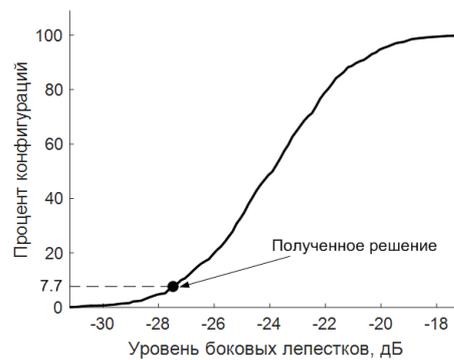
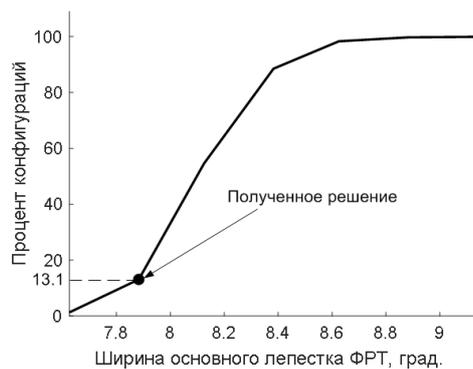


Рисунок 3 – Кумуляты распределения параметров ФРТ разреженных матричных антенных решеток из 36 элементов и положение на них параметров ФРТ найденного решения



а

б

Рисунок 4 – Кумуляты распределения параметров ФРТ разреженных матричных антенных решеток из 49 элементов и положение на них параметров ФРТ найденного решения

Таким образом, во всех случаях применение алгоритма имитации отжига обеспечило получение конфигураций разреженных матричных антенных решеток с низким уровнем боковых лепестков и низкой шириной основного лепестка. Для разреженной антенной решетки с 49 элементами только 13,1% произвольных конфигураций имели ширину основного лепестка меньшую или равную ширине основного лепестка найденной оптимальной конфигурации, а 7,7% имели более низкий или равный уровень боковых лепестков относительно полученного решения. Аналогичные значения для преобразователя из 36 элементов составили 12,8% и 7%, а для решетки из 25 элементов – 13,3% и 4,9%. Таким образом, у всех найденных конфигураций оба оцениваемых параметра ФРТ одновременно являются низкими (ниже средних значений для произвольных конфигураций разреженных матричных антенных решеток с таким же количеством элементов). Это свидетельствует о том, что полученные конфигурации близки к оптимальным и показывает эффективность применения алгоритма имитации отжига для решения задачи поиска оптимальной конфигурации разреженной матричной антенной решетки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00244, <http://rscf.ru/project/22-79-00244/>

Список литературы

1. Hu H. Ultrasonic sparse-TFM imaging for a two-layer medium using genetic algorithm optimization and effective aperture correction / P. Yang, B. Chen, K.R. Shi et al. // NDT & E International. – 2017. – V. 90. – P. 24–32.
2. Optimized 2D array design for Ultrasound imaging / B. Diarra et al. // 2012 Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). – IEEE, 2012. – P. 2718–2722.
3. Genetic algorithm for sparse optimization of mills cross array used in underwater acoustic imaging / D. Teng et al. // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Т. 10. – №. 2. – С. 155.
4. 2-D ultrasound sparse arrays multidepth radiation optimization using simulated annealing and spiral-array inspired energy functions / E. Roux et al. // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. – 2016. – Vol. 63(12). – P. 2138–2149.
5. Самокрутов А.А. Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решетки / А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин / Дефектоскопия. – 2011. – №. 1. – С. 21–38.
6. Holmes C. The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method / C. Holmes, B. Drinkwater, P. Wilcox // Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. – 2004. – V. 46. – №. 11. – P. 677–680.
7. Wooh S.C. Optimum beam steering of linear phased arrays / S.C. Wooh, Y. Shi // Wave motion. – 1999. – Т. 29. – №. 3. – С. 245–265.