

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт математики им. С. Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук «ОФ ИМ СО РАН»

Представление на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации

Анализ и решение задач оптимизации  
направленности фазированных антенных решеток  
коротковолнового диапазона

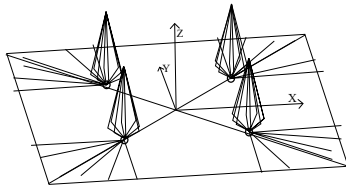
*Выступающий:* Н. Н. Тюнин  
*Руководитель:* д.ф.-м.н., доц. А. В. Евемеев

Омск, 2022

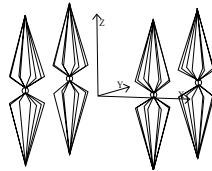
- В задаче имеется одномерная непрерывная группа симметрий.
- Имеются конфигурации ФАР, при которых учет взаимного влияния излучателей ведет к существенному увеличению коэффициента усиления в заданном направлении.
- Для многих конфигураций ФАР задача имеет несколько кластеров из локальных оптимумов с одинаковым значением целевой функции, не эквивалентных относительно равного сдвига фаз во всех излучателях.
- Использование градиентных методов в комбинации с методом ветвей и границ позволяет достичь более качественных решений по сравнению с алгоритмом дифференциальной эволюции в задаче оптимизации фаз и амплитуд ФАР.

- 1 Оптимизация направленности ФАР: основные понятия, постановка задач, проблемы и методы решения
  - Основные понятия
  - Постановка в вещественных числах
- 2 Анализ структуры локальных оптимумов
  - Постановка задачи
  - Вычислительный эксперимент
  - Структура локальных оптимумов
  - Экспериментальная проверка устойчивости решений
  - Дифференциальная эволюция
- 3 Исследование возможностей ФАР в разных условиях
  - Исследование радиочастотных зависимостей
  - Исследование взаимного влияния излучателей

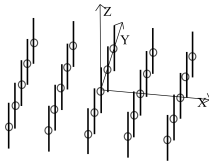
# Оптимизация направленности ФАР: основные понятия, постановка задач, проблемы и методы решения



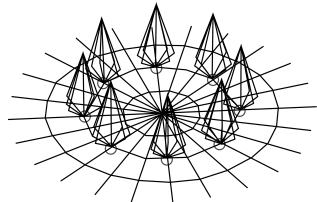
а)



б)



в)



г)

Рис. 1: ФАР различных конфигураций

**Юрков А.С.:** Оптимизация возбуждения передающих фазированных антенных решеток декаметрового диапазона длин волн. ОНИИП, Омск (2014)

**Fuchs B.:** Application of convex relaxation to array synthesis problems. IEEE, P. 634-640, 2014.

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{x}^T \mathbf{G} \mathbf{x} \rightarrow \max, \\ 0 \leq \mathbf{x}^T \mathbf{H}^{(1)} \mathbf{x} \leq 1, \\ \dots \\ 0 \leq \mathbf{x}^T \mathbf{H}^{(n)} \mathbf{x} \leq 1, \\ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^{2n}. \end{array} \right. \quad (1)$$

**Еремеев А.В., Тюнин Н.Н., Юрков А.С.:** Non-Convex Quadratic Programming Problems in Short Wave Antenna Array Optimization. MOTOR 2019 (11584)

## Метод штрафных функций

$$\mathbf{x}^T \mathbf{G} \mathbf{x} - r \cdot \sum_{k=1}^n \left( \min \left( 0, \mathbf{x}^T \mathbf{H}^{(k)} \mathbf{x} \right) + \min \left( 0, 1 - \mathbf{x}^T \mathbf{H}^{(k)} \mathbf{x} \right) \right)^4 \rightarrow \max \quad (2)$$

## Необходимые условия локальной оптимальности

$$\begin{cases} \mathbf{x}_0^T \mathbf{G} \mathbf{x}_0 + 2\mathbf{x}_0^T \mathbf{G} \mathbf{y} \rightarrow \max, \\ 0 \leq \mathbf{x}_0^T \mathbf{H}^{(1)} \mathbf{x}_0 + 2\mathbf{x}_0^T \mathbf{H}^{(1)} \mathbf{y} \leq 1, \\ \dots \\ 0 \leq \mathbf{x}_0^T \mathbf{H}^{(n)} \mathbf{x}_0 + 2\mathbf{x}_0^T \mathbf{H}^{(n)} \mathbf{y} \leq 1, \\ \mathbf{y} \in \mathbb{R}^{2N}. \end{cases} \quad (3)$$

## Цели эксперимента

- Исследование структуры локальных оптимумов
- Сравнение эффективности работы различных алгоритмов
- Исследование возможностей ФАР в разных условиях

## Исследуемые алгоритмы

- Градиентный подъем
- BARON
- Дифференциальная эволюция

## Детали эксперимента

- Антенный моделировщик NEC2
- Направление оптимизации  $70^\circ : 45^\circ$



ФАР	$M$	$M_{ne}$	$M_f$	$M_{y \approx 0}$
ШВИ 2x2	18368	4	1	4
ШВД 2x2	7678	4	1	4
СВД 2x2	523	1	1	1
СВД' 3x3	14	14	3	1
ШВИ 3x3	1070	3	1	3
ШВД 3x3	41	4	4	1
Кольц. 8	124	9	2	9
Кольц. 16	11	6	1	6

## Фазовая симметрия

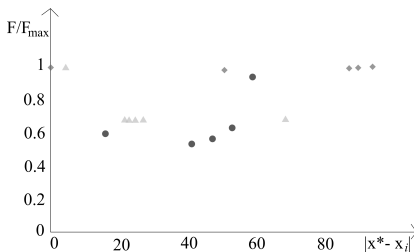
$$\mathbf{i} \rightarrow e^{j\phi} \mathbf{i} \quad (4)$$

**Еремеев А.В., Юрков А.С.:** On Symmetry Groups of Some Quadratic Programming Problems // MOTOR 2020. Shpringer, 2020. Vol. 12095.

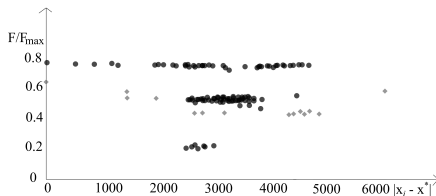
# Сравнение результатов оптимизации градиентного подъема и решателя BARON

ФАР	$\lambda_{min}$	$\sqrt{\frac{N}{\lambda_{min}}}$	Град.		BARON	
			F	t, c	F	t, c
ШВИ 2x2	0.0215	13.6	138.2	<b>0.054</b>	<b>139.2</b>	0.12
ШВИ 3x3	0.0177	70	575.7	0.93	<b>580.6</b>	<b>0.34</b>
ШВД 2x2	0.009	21	459.7	<b>0.13</b>	<b>463.6</b>	0.27
ШВД 3x3	0.0013	6767	915	24.4	<b>925</b>	<b>0.34</b>
СВД 2x2	$2 \cdot 10^{-3}$	44	357	1.9	<b>361</b>	<b>0.16</b>
СВД' 3x3	0.0008	$1 \cdot 10^4$	664	71	<b>1153</b>	<b>1.48</b>
Кольц. 8	$3 \cdot 10^{-3}$	154	217	8.06	<b>218</b>	<b>0.23</b>
Кольц. 16	$6.7 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^6$	727	90.9	<b>734</b>	<b>1.37</b>

$\sqrt{\frac{N}{\lambda_{min}}}$  - оценка сверху евклидовой нормы.



а)



б)

Рис. 2: Структура множества найденных решений для задач ШВИ, ШВД, СВД (а) и СВД' (б)

# Экспериментальная проверка устойчивости решений

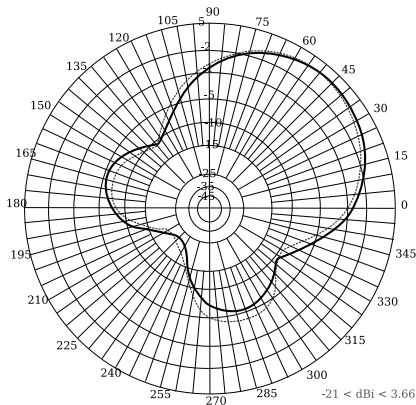


Рис. 3: Диаграммы направленности для ШВИ 2x2 при оптимизации в направлении 70:45 (сплошная линия) и 70:50 (пунктир)

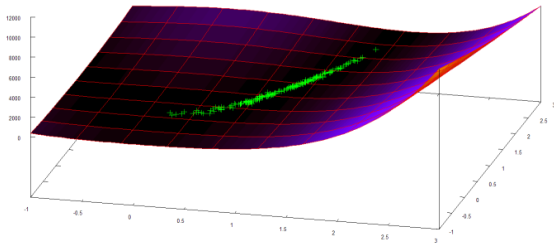


Рис. 4: Поиск минимума функции Розенброка методом ДЭ

- $v = v_1 + f \cdot (v_2 - v_3)$ , где  $v_1, v_2, v_3$  - случайные особи из текущей популяции, не равные друг другу.
- Гибридный алгоритм с градиентным методом.
- Адаптация алгоритма для запуска на GPU.

# Исследование радиочастотных зависимостей

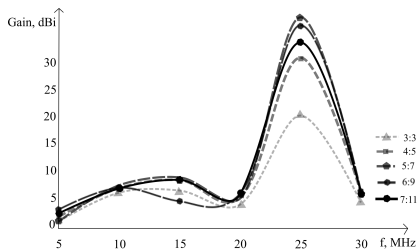
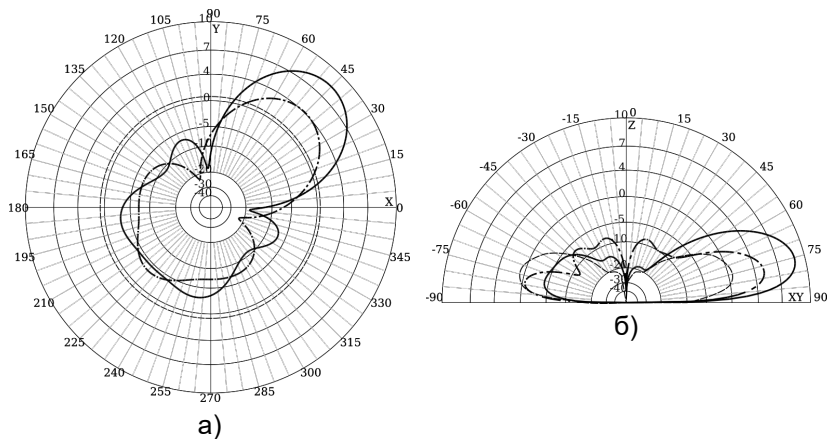


Рис. 5: Сравнение усиления ФАР и одиночного излучателя на различных частотах.



Рис. 6: Вертикальный план диаграммы направленности одиночного излучателя (а) и ФАР 5:7 (б) при 25 МГц

# Исследование взаимного влияния излучателей



**Рис. 7:** Горизонтальный (а) и вертикальный (б) план диаграммы направленности ШВД при расстоянии от центра излучателя до центра решетки 20 м. Пунктирной линией обозначено усиление одиночного излучателя, штрихпунктирной – простое фазирование, сплошной – решение задачи мат. программирования.

- В настоящей работе максимизируется излучение в одном заданном направлении, что в наибольшей степени соответствует системам коротковолновой радиосвязи.
- Разработаны реализации алгоритмов с процедурой возвращения в допустимую область.
- Обоснован подход к снижению размерности задачи фиксированием значения переменной.
- Впервые показано наличие кластеров из локальных оптимумов.
- На открытый вопрос о целесообразности учета взаимного влияния излучателей при оптимизации направленности ФАР КВ диапазона дан положительный ответ.
- Впервые показана нецелесообразность использования широкополосных вертикальных излучателей в составе ФАР коротковолнового диапазона.



- Разработанные алгоритмы оптимизации возбуждения ФАР могут применяться в системах связи коротковолнового диапазона для увеличения дальности, снижения энергозатрат или площади, занимаемой антеннами. Созданное программное обеспечение позволяет производить необходимые для этого расчеты.
- Полученное обоснование необходимости учета взаимного влияния излучателей при оптимизации направленности ФАР, а также результаты вычислительных экспериментов для различных вариантов ФАР могут быть полезны при проектировании новых антенных систем.

1. *Тюнин, Н. Н.* — Задачи невыпуклого квадратичного программирования, связанные с оптимизацией фазированных антенных решеток. /. — Н. Н. Тюнин // Дискретный анализ и исследование операций. — 2021.
2. *Еремеев, А. В.* — Об оптимизации направленности коротковолновых фазированных антенных решеток кольцевой структуры. /. — А. В. Еремеев, Н. Н. Тюнин, А. С. Юрков. — 2022.
3. *Tyunin, N. N.* — On mutual influence of emitters in directivity optimization of shortwave phased antenna arrays. /. — N. N. Tyunin // Journal of Physics: Conference Series. — 2021.

4. *Тюнин, Н. Н.* — Невыпуклые задачи квадратичного программирования в оптимизации коротковолновых антенных решеток. /. — Н. Н. Тюнин // ФМХ ОмГУ - 2019. Сборник статей VII Региональной конференции магистрантов, аспирантов и молодых ученых по физике, математике и химии. — 2020.
5. *Еремеев, А. В.* — Исследование одной задачи квадратичного программирования в оптимизации коротковолновых антенных решеток. /. — А. В. Еремеев, Н. Н. Тюнин, А. С. Юрков // Радиотехника, электроника и связь. Сборник докладов V Международной научно-технической конференции. — 2019.
6. *Еремеев, А. В.* — О структуре множества локальных оптимумов задачи оптимизации фазированных антенных решеток. /. — А. В. Еремеев, Н. Н. Тюнин, А. С. Юрков // Сборник тезисов VII Международной конференции «Проблемы оптимизации и их приложения». — 2018.

7. *Eremeev, A. V.* — Non-Convex Quadratic Programming Problems in Short Wave Antenna Array Optimization. / . — A. V. Eremeev, N. N. Tyunin, A. S. Yurkov // Khachay M., Kochetov Y., Pardalos P. (eds) Mathematical Optimization Theory and Operations Research. MOTOR 2019. Lecture Notes in Computer Science. — 2019.

- VII Международной конференции «Проблемы оптимизации и их приложения» - Омск, июль 2018.
- Международной конференции «Теория математической оптимизации и исследование операций» - Екатеринбург, июль 2019.
- V Международной научно-технической конференции «Радиотехника, электроника и связь» - Омск, октябрь 2019.
- Международной конференции «Теория математической оптимизации и исследование операций» - Иркутск, июль 2021.

**Спасибо за внимание!**