

Тюнин Николай Николаевич

**АНАЛИЗ И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ
НАПРАВЛЕННОСТИ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ
РЕШЕТОК КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА**

2.3.1 — Системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт математики им. С. Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук», г. Омск.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Еремеев Антон Валентинович

Официальные оппоненты: **Картак Вадим Михайлович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
Уфимский государственный авиационный техни-
ческий университет,
заведующий кафедрой

Груздева Татьяна Владимировна,
кандидат физико-математических наук,
Институт динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова Сибирского отделения Рос-
сийской академии наук,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образо-
вательное учреждение высшего образования «Ом-
ский государственный технический университет»

Защита состоится "____" "_____" 2022 г. в ____ часов на заседании дис-
сертационного совета Д 24.2.403.01 созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решет-
нева» по адресу: 660037 г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский
рабочий», 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Си-
бирский государственный университет науки и технологий имени академика
М.Ф. Решетнева» и на сайте <https://www.sibsau.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учрежде-
ния, просьба направлять по адресу: 660037 г. Красноярск, проспект имени
газеты «Красноярский рабочий», 31, ученому секретарю диссертационного со-
вета Д 24.2.403.01.

Автореферат разослан "____" "_____" 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 24.2.403.01,
кандидат технических наук, доцент

Панфилов Илья Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время разработка и анализ эффективных систем радиосвязи имеет большое значение для народного хозяйства. Одной из актуальных задач в этой области является задача оптимизации направленности фазированных антенных решеток (ФАР), представляющих собой антенные системы, распределение фаз и амплитуд на элементах которых позволяет получать направленное излучение. Будучи собранными в антенную систему и разведенными в пространстве, излучатели формируют диаграмму направленности, которая зависит от расположения и конструкции излучателей, а также выбора фаз и амплитуд сигналов, подаваемых на вход излучателей. Возможность формирования направленного излучения позволяет достичь увеличения дальности передачи антенной системы и уменьшить энергозатраты на передачу сигнала.

В диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) задачи оптимизации фаз и амплитуд излучателей, как правило, решаются с использованием некоторых упрощающих предположений (Indenbom M., 2018, Щелкунов С.А., 1955, Фаняев И.А., 1955). Однако, в диапазоне высоких частот (ВЧ) задача оптимизации направленности ФАР оказывается более сложной, и потому менее изучена (Фаняев И.А., 2014, Юрков А.С., 2016). При ограничении суммарной мощности, подаваемой на антенную систему, задача выбора фаз и амплитуд на излучателях может быть решена аналитически (Юрков А.С., 2014). Однако, при ограничении на мощность по каждому входу антенной системы требуется решение невыпуклых задач квадратичного программирования (Fuchs B., 2014). Вообще говоря, задачи квадратичного программирования являются NP-трудными (Murty K., 1987). Для решения таких задач могут применяться методы ветвей и границ (Нечаева М.С., 2000), отсечений (Horst R., 2013), DC-программирования (Стрекаловский А.С., 2003), полуопределенной релаксации (Fuchs B., 2014), эволюционных вычислений (Boriskin A.V., 2010, Rao A., 2017), локального поиска (Кочетов Ю.А., 2008) и др. Для увеличения дальности передачи радиосигнала и сокращения расхода энергии на передающих ФАР требуется провести исследование свойств задачи оптимизации направленного излучения ФАР и разработать алгоритмы ее решения с использованием наиболее адекватных подходов.

Целью данной работы является создание алгоритмов оптимизации направленности излучения ФАР и исследование области применимости различных методов решения этой задачи.

Для достижения указанной цели были решены следующие **задачи**:

1. Изучить структуру множества локальных оптимумов и наличие симметрий в рассматриваемой задаче.
2. Разработать алгоритмы решения задачи, учитывающие структуру множества локальных оптимумов и использующие известные методы математической оптимизации.

3. Сравнить предложенные алгоритмы с известными методами.
4. Исследовать на основе вычислительного эксперимента влияние расположения излучателей и используемой радиочастоты на эффективность работы алгоритмов оптимизации.
5. Сравнить коэффициент усиления ФАР при оптимизации направленности излучения с учетом взаимного влияния излучателей и без учета этого фактора.

Научная новизна:

1. Предложенный гибридный алгоритм дифференциальной эволюции отличается от известных ранее наличием процедуры адаптации штрафа, в которой учитывается возврат в допустимую область посредством масштабирования решения, что приводит к сокращению погрешности получаемых решений.
2. Ранее при решении задач оптимизации направленности ФАР, как правило, не использовалась инвариантность основных свойств решений относительно равного сдвига фаз во всех излучателях. Однако, как показано в настоящей работе, учет такой инвариантности позволяет снизить размерность задачи и в результате сократить среднее время счета некоторых решателей.
3. Впервые для задачи оптимизации направленности ФАР показано наличие кластеров из локальных оптимумов с одинаковым значением целевой функции, и не эквивалентных относительно равного сдвига фаз во всех излучателях.
4. Впервые обоснована целесообразность учета взаимного влияния излучателей при оптимизации направленности ФАР КВ диапазона.

Практическая значимость. 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. Практическая значимость результатов исследования при выполнении работ по антенной тематике подтверждена в АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения».

Теоретическая значимость. Осуществленный в работе переход от задачи оптимизации направленности ФАР в комплексных числах к задаче математического программирования позволил переформулировать в терминах математического программирования известные физические свойства задачи, в частности, инвариантность относительно сдвига фаз и закон сохранения энергии. Благодаря такому переносу, представленные в работе примеры симметрий задачи

были теоретически обобщены на более широкий класс задач квадратичного программирования с использованием теории групп Ли в работах других авторов. Предложенная процедура возврата в допустимую область с помощью масштабирования вектора решения, а также построенная верхняя оценка евклидовой нормы допустимых решений могут быть использованы при разработке новых методов математической оптимизации для задач, аналогичных рассматриваемой. Результаты диссертации используются в учебном процессе в ФГАОУ ВО «Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского».

Методология и методы исследования. В данной работе мы рассматриваем подход к решению задачи максимизации направленности излучения ФАР в заданном направлении при ограничениях, накладываемых на мощность, подаваемую на каждый из излучателей. Такая задача может быть решена только численными методами (Юрков А.С., 2014). Для использования градиентного метода задача сводится к задаче безусловной оптимизации методом штрафных функций.

Вообще говоря, при использовании метода градиентного подъема не гарантируется получение глобального оптимума. Приблизиться к глобальному оптимуму позволяет многократный запуск алгоритма из случайным образом сгенерированных точек. Кроме того, многократный запуск позволяет оценить количество локальных оптимумов, что является некоторым критерием сложности индивидуальной задачи (Еремеев А.В., 2017). Анализ структуры локальных оптимумов позволяет также выявить наличие нетривиальных симметрий.

Еще одним широко используемым подходом к решению задач оптимизации ФАР являются эволюционные алгоритмы, и, в частности, генетические алгоритмы, роевые алгоритмы, алгоритмы дифференциальной эволюции (Indenbom M., 2017, Фаняев И.А., 2017, Rao A., 2017). Использование эволюционных методов требует больше времени, чем использование градиентного подъема, однако, в отличие от градиентных методов, не требует вычисления производных и не подвержен преждевременному завершению в точках стационарности.

Для оценки качества результатов градиентного алгоритма производится их сравнение с решениями, полученными с помощью решателя BARON в пакете GAMS. BARON использует алгоритмы метода ветвей и границ, усиленные различными методами распространения ограничений и двойственности для уменьшения диапазонов переменных в ходе работы алгоритма (Ryoo H.S., 1995). Его использование также представляет альтернативный подход к решению данной задачи, но, поскольку BARON является коммерческим решателем, производство расчетов требует приобретения лицензии, что не всегда приемлемо.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Группа непрерывных симметрий рассматриваемой задачи одномерна и ее элементы соответствуют сдвигу фаз во всех излучателях на равную величину, что позволяет снизить размерность задачи на одну переменную и сократить время счета.