

На правах рукописи



Грачев Максим Викторович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
В МНОГОКАНАЛЬНОЙ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЕ С ВЗАИМНЫМ
ВЛИЯНИЕМ КАНАЛОВ**

2.2.13. «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

г. Рязань 2022 г.

Работа выполнена на кафедре радиотехнических устройств в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

Научный руководитель:

Паршин Юрий Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой радиотехнических устройств
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет
им. В.Ф. Уткина», г. Рязань

Официальные оппоненты:

Аверина Лариса Ивановна,
доктор физико-математических наук, доцент,
заведующая базовой кафедрой системы телекоммуникаций и радиоэлектронной борьбы на базе АО «Концерн «Созвездие» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж

Костров Виктор Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Радиотехника»
Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Самара

Защита состоится «10» марта 2023 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.375.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина» и на официальном сайте университета www.rsgeu.ru

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.375.03
доктор технических наук, доцент

Г. В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современных системах передачи информации, таких как 4G LTE и беспроводная локальная сеть (WLAN) используются многоканальные приемные системы. Они являются технической основой для реализации технологии MIMO, которая считается ключевым фактором для связи пятого 5G и шестого 6G поколений. Высокие скорости передачи информации, емкости сети обеспечиваются освоением и использованием более высоких частот. Как известно, увеличение рабочей частоты позволяет уменьшить электрические размеры антенны, появляется возможность уменьшения массогабаритных показателей всей системы. В мобильных приложениях ограничение на объем занимаемого пространства, а порой и эстетические соображения, возникающие у пользователей, требуют использования малоразмерных приемных систем.

Одновременно с уменьшением размеров многоканальной приемной системы, увеличением числа каналов уменьшается и расстояние между 1азралами, что неизбежно приводит к появлению между ними электромагнитной взаимной связи, которая может существенным образом повлиять на характеристики многоканальной приемной системы в целом, снизить эффективность обработки сигнала. Таким образом, при разработке современных миниатюрных беспроводных многоканальных устройств становится невозможным игнорировать эффект взаимного влияния.

Изменение матрицы взаимных импедансов антенной системы, вызванное эффектом взаимного влияния, приводит к несоответствию между ее выходными импедансами и импедансами нагрузки. Для их согласования 1азрасообразно применять настраиваемые нагрузочные импедансы. Их оптимизация позволяет повысить скорость передачи данных в информационной системе, получить высокое качество принимаемого сигнала и длительный срок службы батареи, что особенно актуально в такой динамично развивающейся области, как «Интернет всего» (IoT).

Степень разработанности темы исследования. Многоканальные приемные системы активно исследовались со второй половины XX века. Значительный вклад в развитие методов оптимальной обработки сигналов в многоканальных приемных системах, в частности с взаимным влиянием внесли такие отечественные и зарубежные ученые, как Д.И. Воскресенский, Ю.Г. Сосулин, Л.И. Аверина, Р.Н. Андреев, О.Г. Вендик, С.И. Гусев, В. В. Доценко, В.Г. Карташевский, Д.С. Козлов, В.В. Костров, Г.Т. Марков, В.А. Мельник, В.А. Обуховец, Ю.Н. Паршин, Д.М. Сазонов, В.И. Слюсар, В. А. Хлусов, М.Ю. Чепелев, Ю.В. Юханов, Т.С. Берд (T.S. Bird), К.Ф. Ворник (K.F. Warnick), Э.Э.М. Вустенбург (E.E.M. Woestenburger), И.Дж. Гупта (I.J. Gupta), М.А. Дженсен (M.A. Jensen), Б.Д. Джеффс (B.D. Jeffs), Дж.С. Ли (J.S. Lee), Р. Мааскант (R. Maaskant), Т.У. Миллер (T.W. Miller), Р.А. Монзинго (R. A. Monzingo), С.К. Свендсен (S.C. Svendsen), А.Т. Де Хуп (A.T. De Hoop) и др.

Во многих работах авторы при расчете характеристик многоканальной приемной системы, обработке сигналов пренебрегают эффектом взаимного влияния. Результаты исследований последних лет доказывают важность учета взаимного влияния каналов многоканальной приемной системы на основ-

ные характеристики радиосистем. Взаимное влияние сказывается не только на пространственных характеристиках многоканальной приемной системы, но и на отношении сигнал-шум (ОСШ) на ее выходе, уменьшая его значение на 1...3 дБ по сравнению со случаем отсутствия взаимного влияния. Проблема учета взаимного влияния при проектировании многоканальных приемных систем и моделировании их работы не решена полностью. Известны модели описания взаимного влияния между некоторыми видами антенных элементов на основе матрицы взаимных импедансов. Показано, что вследствие взаимного влияния в многоканальной приемной системе возникает рассогласование антенной системы с последующим каскадом. Для их согласования используются нагрузочные импедансы. Изменение их значений в каждом 2-м канале позволяет изменять эффективность обработки сигналов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием каналов.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности пространственной обработки сигналов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием каналов путем оптимизации нагрузочных импедансов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи**:

1. Исследование воздействия взаимного влияния в многоканальной приемной системе на характеристики принимаемого процесса, параметры многоканальной системы.
2. Разработка модели многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов и согласующими нагрузочными импедансами.
3. Анализ эффективности применения согласования импедансов в 2-каналах приемной системы с взаимным влиянием каналов в условиях действия комплекса помех.
4. Исследование методов технической реализации многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов и оптимизацией нагрузочных импедансов.

Научная новизна полученных в диссертации результатов заключается в следующем:

1. Предложен метод расчета матрицы взаимных импедансов многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов для антенной системы с произвольными элементами путем применения масштабирующего коэффициента.
2. Разработана модель многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов, в которую включена оптимизация нагрузочных импедансов, как один из этапов пространственной обработки сигналов.
3. Проведена оптимизация нагрузочных импедансов, как одного из этапов пространственной обработки сигналов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием каналов.

4. Впервые обнаружено, что оптимизация нагрузочных импедансов позволяет устранить взаимное влияние каналов при расчете коэффициента шума многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов.

5. Исследована эффективность оптимизации нагрузочных импедансов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием каналов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. При отсутствии внешних помех оптимизация нагрузочных импедансов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием каналов позволяет уменьшить коэффициент шума системы до теоретического минимума, соответствующего отсутствию взаимного влияния.

2. Совместная оптимизация пространственной структуры, нагрузочных импедансов и весового вектора в многоканальной системе приводит к повышению эффективности обработки сигнала и позволяет получить суммарный выигрыш в выходном отношении сигнал-помеха-шум 5...14 дБ по сравнению с неперестраиваемой многоканальной приемной системой, в том числе 2 дБ за счет оптимизации нагрузочных импедансов.

3. Оптимизация нагрузочных импедансов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием каналов позволяет уменьшить СКО оценивания угловой координаты источника детерминированного сигнала в 1,3...1,5 раз по сравнению со случаем без оптимизации.

4. Оптимизация нагрузочных импедансов в энергоэффективном маломерном IoT сенсоре позволяет увеличить пропускную способность ММО системы связи на 20...30% по сравнению со случаем без оптимизации, что эквивалентно выигрышу в отношении сигнал-шум, равному 7...9 дБ.

Внедрение результатов диссертационного исследования. Результаты диссертации внедрены в разработки АО «Московский научно-исследовательский институт «Агат» (г. Жуковский), а также в учебный процесс ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», что подтверждено соответствующими актами.

Направление исследований диссертационной работы связано с тематикой НИР, выполненных и выполняемых в РГРТУ:

1. Разработка методики расчета характеристик модема стандарта LTE с увеличенной дальностью.

2. Анализ надежности и дальности канала связи для различных конфигураций ММО модемов и антенн.

3. Разработка алгоритмов пространственной компенсации помех в моноимпульсном пеленгаторе.

4. Разработка алгоритмов адаптивной пространственной обработки сигналов в моноимпульсном пеленгаторе при действии комплекса помех.

5. Исследование энергоэффективных методов и технологий передачи информации IoT.

Методы проведения исследования. В диссертационной работе при проведении исследования используются методы математической статистики, теории статистических решений, линейной и векторной алгебры, аналитической геометрии, теории матриц. Анализ получаемых данных проводится с использованием численных методов многомерной оптимизации, методов статистического моделирования.

Достоверность полученных результатов диссертационного исследования, полученных расчетным путем и компьютерным моделированием, подтверждается корректным применением элементов теории и математического аппарата, сходимостью полученных в работе результатов к известным для частных случаев.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. 27, 30 Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо), г. Севастополь, 2017, 2020 гг.
2. 11th IEEE International Conference Application of Information and Communication Technologies (AICT2017), г. Москва, 2017 г.
3. 2nd, 4th International Workshop on Radio Electronics & Information Technologies, г. Екатеринбург, 2017, 2018 гг.
4. 24, 25, 26 Международные конференции «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 2018, 2019, 2020 гг.
5. International Radar Symposium 2018 (IRS–2018), г. Бонн, Германия, 2018 г.
6. 23, 24 Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании», г. Рязань, 2018, 2019 гг.
7. Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW, Дивноморское, Краснодарский край, 2019, 2021 гг.
8. 3 Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2020, г. Рязань, 2020 г.
9. 9th, 10th, 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), г. Будва, Черногория, 2020, 2021, 2022 гг.
10. International Scientific and Technical Conference Modern Computer Network Technologies (MoNeTeC), г. Москва, 2020 г.
11. 24th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), г. Москва, 2022 г.

Публикации. По теме работы опубликовано 26 работ, включая статьи и тезисы докладов внутривузовских, всероссийских и международных конференций из них 10 статей включенные в международные базы научного цитирования Scopus и Web of Science, 4 статьи в изданиях из перечня ВАК РФ.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложения, изложенных на 159 страницах (включая 57 рисунков и 1 таблицу). Список литературы содержит 125 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показаны актуальность работы и степень ее значимости, определены цель и задачи исследования, обоснована научная новизна полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены данные о внедрении результатов, апробации работы и публикациях, представлена структура и объем диссертации.

В первой главе диссертации рассмотрено явление взаимного влияния в многоканальной приемной системе, показаны способы его описания. Представлена модель многоканальной приемной системы с учетом взаимного влияния каналов и использованием согласующей цепи для согласования импедансов антенной системы и приемного тракта. Показано воздействие взаимного влияния и согласующей цепи на характеристики сигнала, помех и шумов. Предложена модель многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов и трехэтапной обработкой сигналов, которая включает оптимальную пространственную и весовую обработку, оптимизацию нагрузочных импедансов. Анализ эффективности обработки сигналов в одноканальной приемной системе показал наличие оптимального значения нагрузочного импеданса по критерию минимума коэффициента шума малошумящего усилителя (МШУ). Исследования показали, что эффективность обработки сигналов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием также зависит от нагрузочных импедансов, поиск их оптимального значения является актуальной задачей. Представлена шумовая модель многоканальной приемной системы, которая включает в себя шумы антенны, тепловые шумы МШУ. Сформулированы задачи диссертационного исследования, направленные на повышение эффективности обработки сигналов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием каналов путём оптимизации нагрузочных импедансов.

Во второй главе предложена модель многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов, которая изображена на рисунке 1. Модель состоит из антенной системы, согласующей цепи, блока малошумящих усилителей и блока пространственной весовой обработки. Шумовые свойства антенной системы, величина их взаимного влияния задаются матрицей взаимных импедансов $\mathbf{Z}_A$. Предложен метод расчета матрицы взаимных импедансов многоканальной приемной системы на основе изменения масштаба расстояний между элементами некоторой опорной антенной системы. При расчете матрицы взаимных импедансов используется масштабирующий коэффициент:

$$a_M = d_{nm} / a_{nn}, \quad (1)$$

где d_{nm} – расстояние между элементами реальной антенной системы, a_{nn} – расстояние между элементами опорной антенной системы. Величина $a_M = 0$ соответствует случаю отсутствия взаимной связи, а величина $a_M \gg 1$ – случаю сильной взаимной связи.

Рассмотрены варианты реализации метода масштабирования для антенной системы с элементами в виде микрополосковых печатных антенн. При моделировании многоканальной приемной системы с заданной пространственной структурой или ее изменением в узком диапазоне расстояний расчет матрицы взаимных импедансов производится путем оптимизации коэффициента масштабирования таким образом, чтобы значения элементов матрицы взаимных импедансов реальной антенной системы с моделируемой совпадали в определенных точках. В случае моделирования более сложных многоканальных приемных систем с реконфигурируемой пространственной структурой требуется решение оптимизационной задачи поиска коэффициента масштабирования для каждого значения межэлементного расстояния. Метод масштабирования позволяет уменьшить вычислительную сложность моделирования матрицы взаимных импедансов в 30...40 раз для антенной системы в виде двух микрополосковых печатных антенн.

Предложена модель цепи согласования импеданса антенной системы с входным сопротивлением МШУ. Предложенная модель позволяет учесть воздействие взаимного влияния каналов приемной системы на характеристики сигнала, помех и шумов.

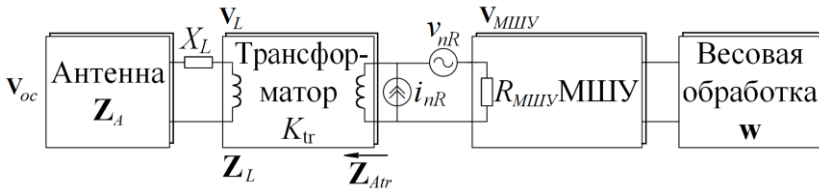


Рисунок 1 – Структурная схема многоканальной приемной системы

Согласование действительной части импеданса антенной системы и значения действительной составляющей входного импеданса МШУ производится при помощи трансформатора без потерь. Диагональная матрица коэффициентов трансформации всех каналов равна

$$\mathbf{K}_{tr} = \left\{ K_{tr}(n, n) = \sqrt{\frac{R_{MШУ}}{R_L(n)}}, n = 1, \dots, N \right\}, \quad (2)$$

где $R_{МИУ}$ – входное сопротивление МШУ, R_L – действительная часть согласующего импеданса Z_L . Трансформатор предназначен для согласования импеданса каждого из элементов антенной системы с входным сопротивлением МШУ соответствующего канала приемного тракта. В результате активная составляющая нагрузки элемента антенной системы равна $R_L(n) = \frac{R_{МИУ}}{K_{tr}^2(n)}$,

$n = 1, \dots, N$. Для компенсации реактивной составляющей импеданса антенной системы последовательно на входе трансформатора включено реактивное сопротивление, величина которого равна $X_L = \{X(n, n), n = 1, \dots, N\}$.

Матричный коэффициент преобразования напряжения сигнала, равный отношению напряжения на входе МШУ к входному напряжению сигнала, равен:

$$Q = K_{tr} K_{tr}^{-2} R_{МИУ} (Z_A + jX_L + K_{tr}^{-2} R_{МИУ})^{-1}. \quad (3)$$

Все дисперсии рассчитываются для источников шумовых токов и напряжений, пересчитанных к входу МШУ. Корреляционные матрицы суммы коррелированных в общем случае шумовых токов и напряжений на входе МШУ соответственно равны:

$$R_{recI} = Z_{Atr}^{-1} M_V Z_{Atr}^{-1H} + Z_{Atr}^{-1} Y_C M_V + M_V Y_C^H Z_{Atr}^{-1H} + M_I, \quad (4)$$

$$R_{recU} = \left(Z_{Atr}^{-1} + \frac{1}{R_{МИУ}} I_{N \times N} \right)^{-1} R_{recI} \left(Z_{Atr}^{-1} + \frac{1}{R_{МИУ}} I_{N \times N} \right)^{-1H}. \quad (5)$$

Матрица дисперсий шумового напряжения, вызванного шумами антенной системы и пересчитанного к входу МШУ, равна [49]:

$$R_{tU} = 4k_B T_{iso} \Delta f Q \text{Re} Z_A Q^H, \quad (6)$$

где $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/°К – постоянная Больцмана, T_{iso} – температура окружающей среды, °К, Δf – полоса частот.

Разработанный метод масштабирования для расчета матрицы взаимных импедансов использован для анализа отношения сигнал-шум в многоканальной приемной системе $q = \frac{w R_S w^H}{w R_N w^H}$, где w – весовой вектор, R_S и R_N

– корреляционная матрица сигнала и помех соответственно. При слабом взаимном влиянии выходное значение ОСШ в многоканальной приемной системе увеличивается пропорционально числу каналов. При увеличении масштабирующего коэффициента или уменьшении межэлементного расстояния значение ОСШ уменьшается до значения, полученного на выходе одноканальной приемной системы. В данном случае уменьшение эффективности обработки сигнала связано со значительным рассогласованием между матрицей

взаимных импедансов элементов антенной системы и входным сопротивлением МШУ. Для увеличения выходного ОСШ необходимо применение весовой обработки сигналов, а также проведение оптимизации нагрузочных импедансов, оптимизации пространственной структуры. Уменьшение значения выходного ОСШ может быть связано как с уменьшением уровня сигнала, так и с увеличением мощности шумов на выходе многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов.

Для анализа мощности и пространственных характеристик шумов, действующих в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием, рассчитаны угловые спектры мощности шумов по методу Бартлетта. Анализ угловых спектров мощности помех и шумов показал, что вследствие взаимного влияния каналов шумы на выходе многоканальной приемной системы становятся коррелированными, а в спектре появляются виртуальные помехи с конечной мощностью и протяженностью по угловой координате. При увеличении степени взаимного влияния каналов происходит увеличение количества виртуальных помех, расширение области, занимаемой каждой помехой в отдельности. Их уровень при сильном взаимном влиянии превышает уровень некоррелированных шумов на 0,9...1,3 дБ. Для уменьшения мощности виртуальных помех предложена оптимизация нагрузочных импедансов, которая позволяет уменьшить уровень мощности пространственно-коррелированных шумов на 0,9...2 дБ.

Проведено исследование взаимного влияния на эффективность шумового согласования многоканального приемного тракта. На рисунке 2 показаны зависимости коэффициента шума

$K_n = 1 + \frac{\mathbf{wR}_{recU}\mathbf{w}^H}{\mathbf{wR}_U\mathbf{w}^H}$ от нормированного

к длине волны λ межэлементного расстояния d при различных условиях согласования. Сплошной линией показан график при значениях $\mathbf{K}_{tr}$, $\mathbf{X}$, полученных симплекс методом Нелдера-Мида. Пунктирной линией показан график, полученный при условии самосо согласования, когда значения параметров согласующей цепи выбираются один раз на этапе проектирования и разработки и не изменяются в процессе функционирования системы: $Z_L = 73,1 - 42,5j$ Ом, что соответствует согласованию импеданса нагрузки с выходным сопротивлением одиночного тонкого вибратора.

Результаты анализа показывают, что взаимное влияние каналов приемной системы увеличивает коэффициент шума при уменьшении межэлементного расстояния. Вместе с тем при оптимальных нагрузочных импедансах коэффициент шума уменьшается на 0,3...0,55 дБ и не зависит от межэлементного расстояния.

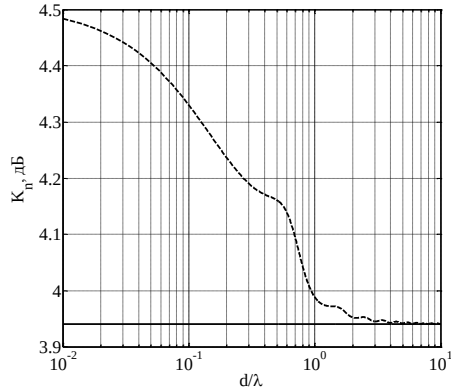


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента шума от межэлементного расстояния

На рисунке 3 представлены зависимости активной и реактивной составляющих импеданса Z_L , полученного в результате их оптимизации по критерию минимума коэффициента шума многоканальной приемной системы симплекс-методом Нелдера-Мида, от нормированного межэлементного расстояния, представленные в прямоугольной (рисунок 3, а) и полярной (рисунок 3, б) системах координат.

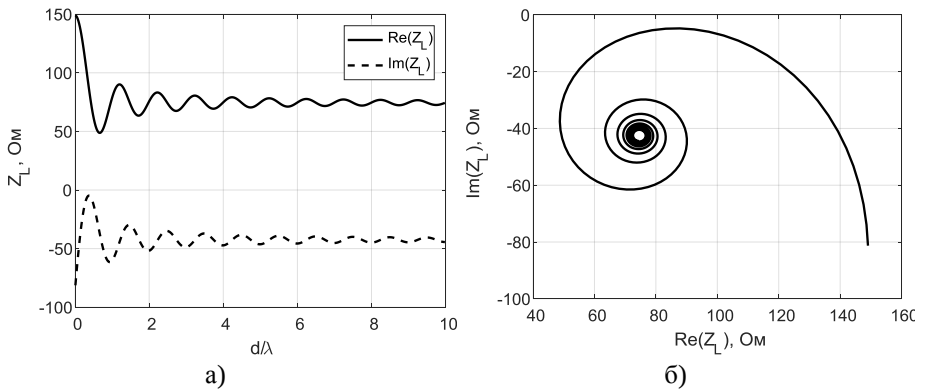


Рисунок 3 – Зависимость оптимального нагрузочного импеданса от межэлементного расстояния в а) прямоугольной и б) полярной системах координат

Проведен анализ зависимости пропускной способности ММО системы передачи информации $C = \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{P_{TX}}{N_{TX}} \tilde{\mathbf{H}} \tilde{\mathbf{H}}^H \right)$ от значения нагрузочных импедансов, где $\mathbf{I}$ – единичная диагональная матрица, P_{TX} – мощности

сигнала, излучаемой всеми передающими антеннами, N_{TX} – число каналов передающей системы, $\tilde{\mathbf{H}}$ – матрица канальных коэффициентов, приведенная к входу МШУ. Оптимизация нагрузочных импедансов позволяет получить выигрыш в пропускной способности 5...60% по сравнению с многоканальной приемной системой без оптимизации нагрузочных импедансов. Его величина зависит от пространственной структуры многоканальной приемной системы.

Показано, что взаимное влияние в значительной степени влияет на характеристики приемной системы. Оптимизация нагрузочных импедансов позволяет значительно уменьшить, а в некоторых случаях скомпенсировать взаимное влияние.

В третьей главе проведен анализ оптимальной обработки сигнала в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием каналов в случае воздействия на нее пространственно-коррелированных помех. Действие внешних помех уменьшает выходное отношение сигнал-помеха-шум (ОСПШ). Для улучшения эффективности приема полезного сигнала предлагается реконфигурирование пространственной структуры, позволяющее в ряде случаев подавить часть помех, оптимизация весового вектора, учитывающего взаимное влияние каналов приемной системы $\mathbf{w} = (\mathbf{Q}\mathbf{S})^H (\mathbf{R}_{tU} + \mathbf{R}_{recU})^{-1}$, а также оптимизация нагрузочных импедансов многоканальной приемной системы. Установлено, что оптимизация нагрузочных импедансов, которая особенно важна при больших значениях коэффициента шума МШУ, позволяет получить выигрыш в ОСПШ 0,1...2 дБ. Совместное реконфигурирование и оптимизация на всех трех этапах обработки сигнала в многоканальной системе позволяет получить суммарный выигрыш 5...14 дБ при определенных условиях.

Исследовано совместное влияние значения точки $iP3$ нелинейного МШУ и степени взаимного влияния на уровень интермодуляционных помех на выходе многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов. Анализ характеристик интермодуляционных помех на выходе многоканальной приемной системы показал, что взаимное влияние может как увеличивать уровень виртуальных интермодуляционных помех, так и уменьшать его. Степень взаимного влияния между каналами приемной системы оказывает существенное воздействие на помехоустойчивость пространственной обработки сигналов в многоканальной приемной системе с нелинейным радиотрактом. Угловые спектры мощности некоррелированных шумов и помех на входе нелинейного МШУ из-за эффекта взаимного влияния каналов имеют области углового спектра с наибольшим сосредоточением энергии. В окрестности направления прихода помех наблюдается расширение углового диапазона с наиболее сосредоточенной энергией до 10° .

Рассмотрены возможности улучшения характеристик радиотехнических систем с помощью оптимизации нагрузочных импедансов. Рассчитаны характеристики обнаружения для многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов. При сильном взаимном влиянии каналов приемной

системы оптимизация нагрузочных импедансов дает значительный выигрыш при обнаружении сигнала, позволяет снизить требования к мощности принимаемого сигнала на 0,5...2,3 дБ.

Проведен анализ предельной эффективности оценивания угловой координаты источника радиоизлучения в многоканальных приемных системах с взаимным влиянием каналов и различной конфигурацией в условиях действия пространственно-коррелированных помех. Эффективность оценивания направления на источник радиоизлучения определяется дисперсией ошибки D_γ оценивания угловой координаты $\gamma_S = \gamma_0$, нижняя граница которой задается неравенством Крамера-Рао:

$$D_\gamma \leq - \frac{1}{\mathbf{M} \left\{ \frac{d^2}{d\gamma_S^2} z(\gamma_S) \right\}_{\gamma_S = \gamma_0}}, \quad (7)$$

где $z(\gamma_S)$ – логарифм отношения правдоподобия.

Результаты анализа показывают, что оптимизация нагрузочных импедансов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием каналов позволяет уменьшить СКО оценивания угловой координаты источника детерминированного сигнала в 1,3...1,5 раз по сравнению со случаем без оптимизации. Полученные в этом случае значения СКО приближаются к эффективности при отсутствии взаимного влияния. Оптимизация нагрузочных импедансов является эффективным инструментом повышения точности оценивания угловой координаты источника радиоизлучения. Техническая реализация оптимизации нагрузочных импедансов в процессе функционирования требует применения микроэлектромеханических систем (МЭМС) СВЧ технологий.

В четвертой главе рассмотрено два численных алгоритма для решения оптимизационной задачи: симплекс-метод Нелдера-Мида и генетический алгоритм. Анализ решения задачи оптимизации нагрузочных импедансов симплекс-методом Нелдера-Мида показал, что при решении задачи максимизации выходного значения ОСШ многоканальной приемной системы необходима модификация целевой функции для технической реализуемости полученных оптимальных нагрузочных импедансов:

$$f_{\text{mod}}(\mathbf{Z}_L) = - \frac{\mathbf{w}\mathbf{R}_S\mathbf{w}^H}{\mathbf{w}\mathbf{R}_{n+J}\mathbf{w}^H} - \beta \times \text{Re}\mathbf{Z}_L^T \times \chi(-\text{Re}\mathbf{Z}_L), \quad (8)$$

где коэффициент $\beta > 0$ должен быть минимально достаточным для достижения неотрицательности действительной части нагрузочных импедансов, $\chi(\bullet)$ – функция Хэвисайда. Данная модификация показала высокую эффективность при расчете коэффициента шума многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов, а также при расчете выходного ОСПШ.

Проведенный сравнительный анализ алгоритмов показал, что симплекс-метод Нелдера-Мида обладает большей точностью определения оптимальных значений нагрузочных импедансов при малых межэлементных расстояниях. При количестве каналов $N > 8$ и невысоких требованиях к точности искомым оптимальным значениям нагрузочных импедансов генетический алгоритм дает выигрыш не менее 1,3 раз по временным затратам.

Рассмотрены аспекты технической реализации перестраиваемых активной и реактивной составляющих нагрузочных импедансов на основе МЭМС СВЧ. Предложены различные варианты согласования антенных элементов с МШУ: 1) априорная оптимизация и 2) оптимизация перестраиваемых в процессе работы системы нагрузочных импедансов. Оптимизация неперестраиваемых нагрузочных импедансов на этапе проектирования и разработки многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов дает выигрыш в ОСПШ до 1,5 дБ при малых d/λ по сравнению с импедансами, заданными из условия самосогласования. Отметим, что подстройка перестраиваемых нагрузочных импедансов дает выигрыш в ОСПШ 2...4 дБ. Несмотря на небольшой выигрыш в выходном ОСПШ по сравнению с перестраиваемыми нагрузочными импедансами, применение неперестраиваемых нагрузочных импедансов позволяет значительно упростить техническую реализацию при сохранении достаточно высокой эффективности.

Исследовано влияние погрешности установки нагрузочных импедансов на поведение целевой функции. Показано, что при цифровой реализации команд управления перестраиваемых нагрузочных импедансов достаточно 5 разрядов, чтобы получить точность установки, достаточную для получения разницы между идеальной и реальной характеристикой ОСШ менее 0,15 дБ.

Проведен расчет пропускной способности и энергоэффективности ММО системы связи малоразмерного многоканального IoT сенсора с взаимным влиянием каналов. Малые размеры многоканальных IoT сенсоров с малым энергопотреблением приводят к появлению существенного взаимного влияния между каналами приемной системы. Рассчитаны зависимости пропускной способности ММО системы передачи информации малоразмерного многоканального IoT сенсора с взаимным влиянием каналов для различной конфигурации антенной системы многоканального сенсора. Анализ полученных зависимостей показал, что оптимизация нагрузочных импедансов позволяет увеличить пропускную способность системы до значения, близкого к полученному без учета взаимного влияния, выигрыш в энергетической эффективности составляет 9,3...14,4 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении описаны основные результаты диссертационного исследования:

1. Исследован метод расчета матрицы взаимных импедансов многоканальной приемной системы с антенной системой в виде микрополосковых элементов на основе изменения масштаба расстояний между элементами некоторой опорной антенной системы. Метод масштабирования позволяет

уменьшить вычислительную сложность моделирования матрицы взаимных импедансов в 30...40 раз для антенной системы в виде двух микрополосковых печатных антенн.

2. Исследованы корреляционные свойства шумов, действующих в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием каналов. Их уровень при сильном взаимном влиянии превышает уровень некоррелированных шумов на 0,9...1,3 дБ. Для уменьшения мощности виртуальных помех предложена оптимизация нагрузочных импедансов, которая позволяет уменьшить уровень мощности пространственно-коррелированных шумов на 0,9...2 дБ.

3. Исследована возможность шумового согласования и его влияние на характеристики приемной системы с взаимным влиянием каналов. Установлено, что взаимное влияние каналов приемной системы уменьшает эффективность обработки сигнала при уменьшении расстояния между каналами. Оптимизация нагрузочных импедансов по выбранному критерию позволяет повысить эффективность обработки сигнала и получить значения критерия эффективности, близкие к значениям, получаемым в системе без взаимного влияния.

4. Показано, что при отсутствии помех оптимизация нагрузочных импедансов при учете взаимного влияния каналов приемной системы позволяет уменьшить коэффициент шума системы до теоретического минимума, соответствующего отсутствию взаимного влияния. Получаемое в результате оптимизации минимальное значение коэффициента шума не зависит от межэлементного расстояния.

5. Проведено исследование эффективности применения оптимизации нагрузочных импедансов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием. Установлено, что при обнаружении источника радиоизлучения и оценивании направления его прихода в условиях действия комплекса помех в многоканальной приемной системе с сильным взаимным влиянием согласование нагрузочных импедансов дает значительный выигрыш, позволяет снизить требования к мощности принимаемого радиолокационной станцией отраженного сигнала.

6. Исследованы методы технической реализации многоканальной приемной системы с оптимизацией нагрузочных импедансов. Для реализации перестраиваемых нагрузочных импедансов предлагается использовать МЭМС СВЧ технологии. Исследовано влияние ошибки установки значений нагрузочных импедансов, полученных в результате оптимизации. Проведенный анализ показал, что одновременная ошибка во всех каналах 10...25% приводит к уменьшению ОСШ на 1...2,5 дБ.

7. Проведен анализ пропускной способности и энергоэффективности ММО системы связи малоразмерного многоканального IoT сенсора с взаимным влиянием каналов. Показано, что оптимизация нагрузочных импедансов в энергоэффективном малоразмерном IoT сенсоре позволяет увеличить пропускную способность ММО системы связи на 20...30% по сравнению со случаем без оптимизации, что эквивалентно выигрышу в отношении сигнал-шум, равному 7...9 дБ.

Перспективой дальнейшего развития алгоритмов пространственной обработки сигналов в многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов является разработка алгоритмов совместной адаптации нагрузочных импедансов, пространственной структуры, весового вектора.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из перечня ВАК:

1. Грачев, М. В. Отношение сигнал-шум в многоканальной приемной системе с сильным взаимным влиянием пространственных каналов / М. В. Грачев, Ю. Н. Паршин // Цифровая Обработка Сигналов. – 2021. – № 3. – С. 11-16.
2. Грачев, М.В. Сравнительный анализ алгоритмов поиска оптимального значения нагрузочных импедансов многоканальных радиосистем с взаимным влиянием / М. В. Грачев, Ю. Н. Паршин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2020. – № 73. – С. 10-18.
3. Паршин, Ю. Н. Многоэтапная реконфигурируемая обработка сигналов в пространственно распределенной радиосистеме / Ю. Н. Паршин, М. В. Грачев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2019. – № 67. – С. 3-10.
4. Грачев, М. В. Эффективность технической реализации нагрузочных импедансов многоканальной радиосистемы с взаимным влиянием каналов / М. В. Грачев, Ю. Н. Паршин // Радиотехника. – 2020. – Т. 84, № 11(21). – С. 39–47.

В изданиях, включенных в реферативную базу «Scopus»:

5. Parshin, Yu. Influence of Signal and Interference Spatial Correlation on the MIMO Communication System's Channel Capacity / Yu. Parshin, A. Parshin, M. Grachev // 2022 24th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). – 2022. – Pp. 1-5.
6. Grachev, M. V. Interference Immunity of Signal Processing in the Presence of Interferences in Information System by Means of Optimal Loading Matching / M. V. Grachev, Yu. N. Parshin // Proceedings of the 2nd International Workshop on Radio Electronics & Information Technologies (REIT 2 2017), CEUR-WS. – 2017. – Pp. 41–47.
7. Parshin, Yu. Intermodulation Interferences Immunity in Receiving Path of Active Antenna Array Based on NI USRP-2943 SDR Transceivers / Yu. Parshin, S. Kolesnikov, M. Grachev // Application of information and communication technologies – AICT2017. – 2017. – Vol 2. – Pp. 75-78.
8. Parshin, Yu. Multichannel Radio System Configuration in Conditions of Intensive Interferences / Yu. Parshin, M. Grachev // 2020 International Scientific and Technical Conference Modern Computer Network Technologies (MoNeTeC). – Moscow, Russia. – 2020. – Pp. 39-44.
9. Parshin, Yu. N. Target Detection Using Optimal Load Matching and Interference Nulling / Yu. N. Parshin, M. V. Grachev // Proceeding it the 2018 19th International Radar Symposium (IRS). – 2018. – Pp. 1-7.

10. Grachev, M. Efficiency of the Angular Coordinate Measurement of Autonomous Cars by Monopulse Radar with Interference Cancellation / M. Grachev, Yu. Parshin // Proceeding of the 2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). – Budva, Montenegro. – 2020. – Pp. 641-644.

11. Grachev M. Analysis of the Clustering Algorithm Effectiveness when an Autonomous Car's Estimating the Angular Coordinates / M. Grachev, Yu. Parshin // Proceeding of the 2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). – Budva, Montenegro. – 2021. – Pp. 203-206.

12. Parshin, Yu. N. Efficiency of the Angular Coordinate Estimation under the Action of Spatially Correlated Interferences and Mutual Influence of Spatial Channels / Yu. N. Parshin, M. V. Grachev // Proceeding of the 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW. – Divnomorskoe, Krasnodar Region, Russia. – 2019. – Pp. 408-411.

13. Parshin, Yu. N. Signal's spatial processing in the radiation pattern's main lobe in condition of interferences and correlated noise / Yu. N. Parshin, M. V. Grachev // Proceeding of the 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW. – Divnomorskoe, Krasnodar Region, Russia. – 2021. – Pp. 1-4.

14. Grachev, M. Channel Capacity and Efficiency Energy of Small-Size IoT Sensor in MIMO Communication System / M. Grachev, Yu. Parshin // Proceeding of the 2022 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). – Budva, Montenegro. – 2022. – Pp. 151-154.

В прочих изданиях:

15. Паршин, Ю.Н. Анализ эффективности пространственной обработки сигналов в нелинейном приемном тракте различной архитектуры методом масштабирования / Ю. Н. Паршин, С. В. Колесников, М. В. Грачев // сборник научных трудов 27-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017). – г. Севастополь. – 2017. – Т. 3. – С. 722 – 728.

16. Грачев, М. В. Расчет матрицы взаимных импедансов произвольных антенных систем методом масштабирования // Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах: межвузовский сборник научных трудов – Рязань: Редакционно-издательский центр РГРТУ. – 2019. – Вып. 8. – С. 47-50.

17. Грачев, М.В. Анализ применения метода масштабирования для вычисления матрицы взаимных импедансов многоканальных радиосистем с взаимным влиянием // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: межвузовский сборник научных трудов – Рязань: Редакционно-издательский центр РГРТУ. – 2020. – Вып. 9. – С. 13-16.

18. Грачев, М.В. Расчет эффективности согласования нагрузки многоканальной радиоприемной системы в условиях действия пространственно коррелированных шумов / М. В. Грачев // Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах: межвузовский сборник научных трудов – Рязань: Редакционно-издательский центр РГРТУ. – 2018. – Вып. 7. – С. 16–19.

19. Грачев, М.В. Эффективность оптимального согласования нагрузки многоканального радиотракта в условиях действия пространственно коррелированных шумов / М. В. Грачев, Ю. Н. Паршин // XXIV международная научно-техническая конференция. Радиолокация, навигация, связь. Научно-исследовательские публикации. – 2018. – Т. 5. – С. 295-300.

20. Грачев, М. В., Анализ характеристик пространственно-коррелированных шумов в многоканальной приемной системе с взаимным влиянием / М. В. Грачев, Ю. Н. Паршин // сборник научных трудов 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо2020). – г. Севастополь. – 2020. – Т. 2. – С. 94-95.

21. Грачев, М.В. Анализ пропускной способности ММО системы связи с учетом взаимного влияния каналов приемного тракта / М. В. Грачев, Ю. Н. Паршин // XXV международная научно-техническая конференция. Радиолокация, навигация, связь. – 2019. – С. 242–248.

22. Паршин, Ю. Н. Помехоустойчивость активной антенной решетки при действии интермодулирующих и интермодуляционных помех в радиотракте с нулевой промежуточной частотой / Ю. Н. Паршин, С. В. Колесников, М. В. Грачев // XXIII международная научно-техническая конференция. Радиолокация, навигация, связь. Научно-исследовательские публикации. – 2017. – Т. 3. – С. 1092–1097.

23. Грачев, М.В. Расчет характеристик обнаружения многоканального радиотракта при оптимальном согласовании нагрузок в условии действия помех. / М. В. Грачев // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязанский государственный радиотехнический университет. – 2018. – С. 129–131.

24. Паршин, Ю.Н. Квазиоптимальное оценивание угловой координаты источника радиоизлучения в двухканальной приемной системе / Ю. Н. Паршин, М. В. Грачев. // Сборник трудов международной научно-технической и научно-методической конференции «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2020. – 2020. – Т. 1. – С. 90-95.

25. Грачев, М.В. Особенности расчета границы Крамера-Рао при оценивании угловой координаты источника радиоизлучения в малоканальных приемных системах / М. В. Грачев, Ю. Н. Паршин // XXVI международная научно-техническая конференция. Радиолокация, навигация, связь. – 2020. – Т. 3. – С. 370-378.

26. Грачев, М.В. Техническая реализация нагрузочных импедансов многоканальных приемных систем с компенсацией взаимного влияния / М. В. Грачев // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязанский государственный радиотехнический университет. – 2019. – С. 99-100.

Грачев Максим Викторович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
В МНОГОКАНАЛЬНОЙ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЕ С ВЗАИМНЫМ
ВЛИЯНИЕМ КАНАЛОВ

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __. __.22. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ _____

Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.