

На правах рукописи



Кагаленко Михаил Борисович

**АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ЧАСТОТНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ
ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.12.04 —
«Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (ФГБОУ ВО «РГРТУ»).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кошелев Виталий Иванович

Официальные оппоненты: **Костров Виктор Васильевич**,
доктор технических наук, профессор,
Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Каменский Илья Владимирович,
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация: АО «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В.В. Тихомирова»

Защита состоится 24 июня 2021 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 при Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на сайте <http://www.rsreu.ru/post-graduate/dissertatsii>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.211.04.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.211.04
доктор технических наук, профессор



Г.В. Овечкин

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Степень её разработанности. Количественная оценка распределения мощности по частотам на основе дискретных отсчётов относится к числу основных задач, возникающих при обработке радиотехнических сигналов. Действительные полигармонические сигналы возникают при таких измерениях, как приём звуковых сигналов микрофонами, наблюдения за циклами изменения светимости астрономических объектов, а также измерение пульса пациента. Комплексные сигналы наблюдаются в магнитно-резонансных сканерах и квадратурных детекторах радиоприёмных устройств и уровнемеров с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Среди чрезвычайно большого числа публикаций в данной области следует отметить фундаментальные публикации Дольфа, Блэкмана, Марпла-мл., Оппенгейма, Добеши, Троппа, Донохо и других. Существенный вклад внесли такие отечественные учёные, как Чебышёв, Золотарёв, Котельников, Писаренко, Харкевич, Тихонов, Бакулев и другие.

Наряду с теоретическими работами опубликовано и большое число исследований практической направленности. Среди наиболее тесно связанных с тематикой данной работы можно выделить монографию В.И.Кошелева «АРСС модели случайных процессов», использовавшую оптимизационные подходы для понижения порядка АРСС – модели сигнала. Радиоволновые уровнемеры с линейной частотной модуляцией находят широкое применение при организации технологических процессов в различных отраслях промышленности. Неоднородности в используемой ёмкости или волноводном тракте приводят к появлению в приёмном устройстве сигнала биений, представляющего собой, как правило, сумму нескольких спектральных составляющих, частота каждой из которых пропорциональна дальности до отражателя. Практическая важность повышения точности измерения уровня при наличии мешающих отражений уже привлекла к теме внимание исследователей. В ряде публикаций практической направленности, как, например, работы В.М. Давыдочкина, упор делался на точности определения доминирующей частотной компоненты сигнала и борьбе с мешающими отражениями. Однако нахождение нескольких синусоидальных составляющих сигнала одновременно может представлять практический интерес в таких приложениях, как измерение уровня слоев в резервуаре, содержащем несколько несмешивающихся жидкостей (например, воду и нефть). Кроме того, обработка сигналов, параллельно полученных массивом приёмников, требует методов оценки общих спектральных составляющих набора сигналов.

Анализ физической природы ряда радиотехнических систем указывает, что описание N отсчётов полигармонического комплексного сигнала даётся моделью следующего вида:

$$y_n = \hat{y}_n + \varepsilon_n = \sum_{k=1}^K a_k e^{i\omega_k t_n} + \varepsilon_n, \quad \omega_k = 2\pi f_k + id_k, \quad (1)$$
$$n = 1, \dots, N,$$

где для каждой из K частотных составляющих a_k — комплексная амплитуда, f_k — частота синусоидальной составляющей, d_k — фактор затухания, t_n — время отсчёта, ε_n — комплексный аддитивный шум. Эта модель сигнала описывает функционирование многих радиотехнических систем и служит основой представленной работы.

При известных частотах ω_k , $k = 1, \dots, K$, оценка амплитуд a_k в выражении (1) сводится к стандартной задаче линейной регрессии, надёжные методы решения которой хорошо изучены и реализованы в свободно доступной библиотеке LAPACK (Linear Algebra Package). Если $K = N$ и частоты f_k распределены с постоянным шагом, то вычисление амплитуд a_k достигается алгоритмом дискретного преобразования Фурье (ДПФ). С другой стороны, оценка неизвестного числа частот по дискретным отсчётам остаётся предметом исследований. В отсутствие шума $N = 2K$ отсчётов с постоянным временным шагом позволяют однозначно определить амплитуды и частоты комплексных экспонент, используя алгоритм Прони, однако в практических применениях такая ситуация крайне маловероятна. При наличии шума алгоритм Прони не даёт состоятельную оценку частот. Избыточное по сравнению с количеством частотных составляющих число отсчётов сигнала позволяет снизить влияние шума на оценки параметров, и в дальнейшем основное внимание будет сосредоточено на вопросах практической реализации основанных на оптимизации подходов к этой задаче.

Целью данной работы является разработка вычислительных алгоритмов для повышения разрешающей способности радиотехнических систем, минимизирующих число спектральных составляющих в параметрической модели полигармонического сигнала и обеспечивающих разрешение близко расположенных частот с использованием ограниченного числа измеренных отсчётов сигнала.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать алгоритм аппроксимации сигнала с помощью метода нелинейных наименьших квадратов, минимизирующий порядок модели, требуемый для описания сигнала с заданной точностью.
2. Обосновать методы построения оптимального по норме Ганкеля приближения многокомпонентной функции и разработать численную реализацию, применимую к рациональным функциям с кратными полюсами.
3. Разработать алгоритмы представления сигналов в форме авторегрессионной модели скользящего среднего, позволяющей понижать её порядок с использованием метода оптимальной редукции.
4. Разработать алгоритмы формирования фильтров и банков фильтров с заданной амплитудно-частотной характеристикой.

Методология и методы исследования. В диссертации применялись теория и алгоритмы оптимизации, теория операторов Ганкеля, методы вычислительной линейной алгебры. Результаты проверены с помощью вычислительных

экспериментов, а также путём обработки экспериментально полученных сигналов.

Научная новизна.

1. Реализован алгоритм частотного анализа на основе итеративного увеличения размерности модели сигнала в методе нелинейных наименьших квадратов, использующий критерий пошаговой регрессии для добавления частотных составляющих и включающий этап градиентного уточнения модели на каждой итерации.
2. Получены справедливые при всех частотах аналитические выражения дисперсии оценки частоты гармонического сигнала методом нелинейных наименьших квадратов, что позволяет анализировать чувствительность к шуму радиоволновых уровнемеров на всём диапазоне расстояний.
3. Разработана модификация АРСС—модели Писаренко, обеспечивающая количественное моделирование амплитуд составляющих полигармонического сигнала.
4. Теоретически обоснован и реализован алгоритм оптимального по норме Ганкеля приближения многокомпонентной рациональной функции с полюсами произвольного порядка, что позволило применить этот метод аппроксимации к анализу сигналов, полученных массивами приёмных устройств и к разработке банков цифровых фильтров.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Предложена реализация алгоритма нелинейных наименьших квадратов, отличающаяся процедурой выбора предполагаемых частот и последующим уточнением параметрической модели, что позволяет снизить её размерность до трёх раз по сравнению с методом ортогонального согласованного сопоставления, а применительно к задаче измерения частоты биений в вычислителе уровнемера снизить погрешность, вызванную мешающим отражателем, в 1,8 раза.
2. Получены аналитические выражения дисперсии оценки частоты гармонического сигнала, справедливые, в отличие от известных, для всего интервала её возможных значений, что позволяет оценивать чувствительность оценки к отношению сигнал—шум в окрестности нулевой частоты и частоты Котельникова.
3. Предложена модификация метода Писаренко, обеспечивающая, в отличие от базового метода, возможность оценки амплитуд частотных составляющих полигармонического сигнала.
4. Математически обоснованы и численно реализованы алгоритмы оптимального по норме Ганкеля приближения многокомпонентной функции и основанная на них процедура спектрального анализа, позволившая определить направление на источник звука путём обработки сигналов от массива ненаправленных микрофонов, сократив до пяти раз

требуемое число временных выборок по сравнению с известными алгоритмами.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- математическим обоснованием предлагаемых алгоритмов на основе ранее опубликованных теоретических результатов;
- результатами математического моделирования, то есть обработки искусственно сгенерированных сигналов с известными спектральными компонентами и аддитивным шумом, и последующего сравнения заданных и обнаруженных частот;
- обработкой экспериментальных сигналов биений, полученных с помощью ЛЧМ уровнемера, который установлен на стенде, обеспечивающем известное положение основного и мешающих отражений;
- результатами обработки зафиксированных с помощью массива микрофонов звуковых сигналов при точно контролируемом направлении на источник звука;
- сравнением характеристик синтезированных цифровых фильтров с заданными.

Практическая значимость. Полученные результаты применяются в Рязанском приборостроительном ООО предприятие «Контакт-1» для обнаружения мешающих отражений на фоне более сильного основного сигнала, а также внедрены в программное обеспечение прибора БАРС 351 для измерения положения границы между несмешивающимися жидкостями, что подтверждено актом о внедрении. Кроме того, результаты используются в учебном процессе Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, что также подтверждено актом о внедрении.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на восьми конференциях :

- Шестнадцатая всероссийская научно–техническая конференция студентов, молодых учёных и специалистов, Рязань, РГРТУ, 2011;
- Третья международная Средиземноморская конференция по встраиваемым системам, IEEE “Mediterranean Conference on Embedded Computing”—MECO 2014 (Scopus);
- Двадцать пятая международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо), г. Севастополь, 2015 (РФ);
- Двадцать третья Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам Санкт-Петербург, Россия, 2016—ICINS 2016 (Scopus);
- Пятая международная Средиземноморская конференция по встраиваемым системам, IEEE “Mediterranean Conference on Embedded Computing”—MECO 2016 (Scopus, WoS);

- Шестая международная Средиземноморская конференция по встраиваемым системам, IEEE “Mediterranean Conference on Embedded Computing”—MECO 2017 (Scopus, WoS);
- Седьмая международная Средиземноморская конференция по встраиваемым системам, IEEE “Mediterranean Conference on Embedded Computing”—MECO 2018 (Scopus);
- Восьмая международная Средиземноморская конференция по встраиваемым системам, IEEE “Mediterranean Conference on Embedded Computing”—MECO 2019 (Scopus);

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 15 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 9 — в публикациях, индексируемых Web of Science и Scopus. Зарегистрированы 2 патента (на способ и на полезную модель) .

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и 6 приложений. Полный объем диссертации составляет 141 страницу, включая 43 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 142 наименования.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы данной диссертационной работы, приведён краткий обзор относящихся к ней методов и научной литературы, сформулированы цель и задачи работы, а также её научная новизна и практическая значимость.

Первая глава рассматривает вопросы реализации спектрального анализа методом нелинейных наименьших квадратов (ННК). Использование метода оптимизации с разделением переменных позволяет сосредоточить внимание на поиске частот, при этом амплитуды и фазы оцениваются стандартными алгоритмами наименьших квадратов. Предлагаемый алгоритм **1** относится к семейству «жадных» алгоритмов, которые пошагово увеличивают размерность модели, добавляя к ней новую частотную составляющую на каждой итерации.

Данные: дискретизированный сигнал $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_N]$

Результат: частотные составляющие сигнала ν

1 Пусть $f_n \equiv n/N, n = 0 \dots N$;

2 $m \leftarrow 0$;

3 повторять

4 $m \leftarrow m + 1$;

5 $n_{\max} \leftarrow \arg \max_n \Delta R(\mathbf{y}, \nu^{(m-1)}, f_n)$;

6 $\nu^{(m)} = [\nu_1^{(m)} \dots \nu_m^{(m)}] \leftarrow \text{optim}(R, [\nu_1^{(m-1)} \dots \nu_{n_{\max}}^{(m-1)}])$;

7 вычислить *критерий останковки*

8 пока критерий останковки;

Алгоритм 1: алгоритм вычисления разреженного представления сигнала

Производится пошаговое увеличение размерности задачи — числа спектральных составляющих. Уже найденные частоты не остаются неизменными, но заново оптимизируются на каждом шаге. При этом на строке 5 производится дискретный глобальный одномерный поиск максимума коэффициента детерминации

$$R(\mathbf{y}, \boldsymbol{\nu}) = \frac{1}{\|\mathbf{y}\|} \sqrt{\|\mathbf{y}\|^2 - \|\mathbf{r}(\boldsymbol{\nu})\|^2}, \quad (2)$$

где $\mathbf{r}(\boldsymbol{\nu})$ —невязка модели при частотах $\boldsymbol{\nu}$, а на строке 6 — непрерывный локальный многомерный поиск максимума. Функция $\text{optim}(R, \boldsymbol{\nu}_0)$ на строке 6 — какая-либо процедура оптимизации (градиентного поиска максимума) по нескольким переменным $\boldsymbol{\nu}$ коэффициента детерминации $\boldsymbol{\nu} = \arg \max_{\boldsymbol{\nu}} R(\mathbf{y}, \boldsymbol{\nu})$ начиная со стартового значения $\boldsymbol{\nu}_0$. Обработка новым алгоритмом численно синтезированного сигнала с двумя близко расположенными частотами останавливается на второй итерации после нахождения обеих частот (левый график на рисунке 1). В то же самое время популярный метод ортогонального согласованного сопоставления (более четырёх тысяч цитирований первой публикации метода) останавливается только после добавления к модели семи частот (правый график на рисунке 1), несмотря на то, что анализируемый сигнал, будучи вычисленным в арифметике с плавающей точкой двойной точности, имеет очень низкий ($\sim 10^{-15}$) уровень ошибок квантования.

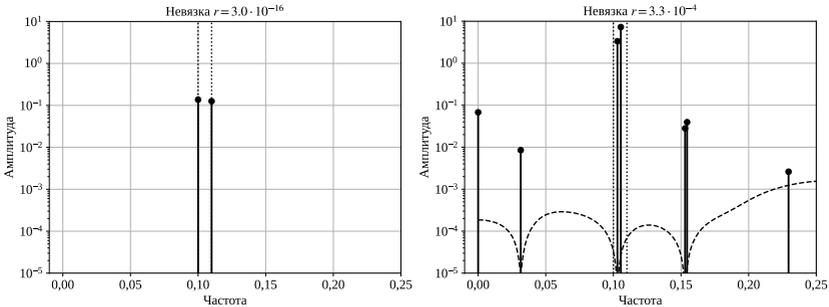


Рисунок 1 — Идентификация частотных составляющих тестового сигнала

Измеренные отсчёты радиотехнических сигналов содержат добавочный шум в результате как ошибок квантования, так и влияния внешних факторов. Для наиболее простого случая единичной частоты в действительном сигнале получены аналитические выражения дисперсии оценки в зависимости от мощности шума, а также частоты и фазы. В отличие от ранее опубликованных, представлены выражения, справедливые на всём интервале частот от нуля до частоты Котельникова, включая зону вблизи границ интервала, где дисперсия оценки сравнима с расстоянием до границы. На рисунке 2 показаны вычисленные значения дисперсии оценки частоты как функции частоты исходного сигнала μ при

трёх значениях относительной мощности шума χ . Сплошными линиями показаны полученные нами асимптотические оценки, а маркерами \times — результаты статистического моделирования. Как свидетельствует график, теоретические результаты находятся в количественном согласии с результатами вычислительного эксперимента.

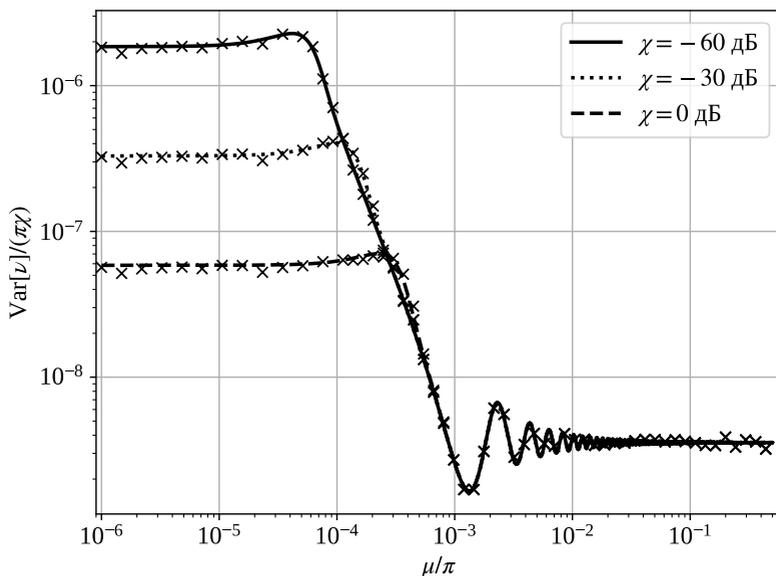


Рисунок 2 — Дисперсия оценки частоты при $\phi = 0$, $N = 1000$

Разработанный алгоритм спектрального анализа наименьших квадратов использован для анализа сигналов, полученных ЛЧМ уровнем. Серийный образец высокоточного радиочастотного уровнямера БАРС 351 производства Рязанского приборостроительного ООО предприятия «Контакт-1» соединён с волноводом, снабжённым перемещаемой нагрузкой, положение которой контролируется оператором установки. Кроме того, в волновод через неизлучающую щель введён штырь, моделирующий неподвижную мешающую неоднородность. Уровеньмер сопряжён с персональным компьютером, снабжённым программным обеспечением для записи сигналов биений с целью последующей обработки. Каждый из отражателей привносит в сигнал биений синусоидальную составляющую, частота которой пропорциональна расстоянию до него. При этом наличие мешающего отражателя привело к появлению в сигнале дополнительной частоты, негативно влияющей на точность оценки, если алгоритм обработки её не учитывает. Результаты обработки экспериментальных сигналов представлены

на рисунке 3. По горизонтальной оси отложено расстояние d между неподвижным и подвижным отражателями. Алгоритм использовался в двух режимах. Первый заключается в нахождении одной частотной компоненты в сигнале биений, что приводит к ошибке дальности до подвижного отражателя E_1 . Второй режим отыскивает сразу две частоты, при этом ошибка дальности до подвижного отражателя обозначена на графиках E_2 . Использование параметрической

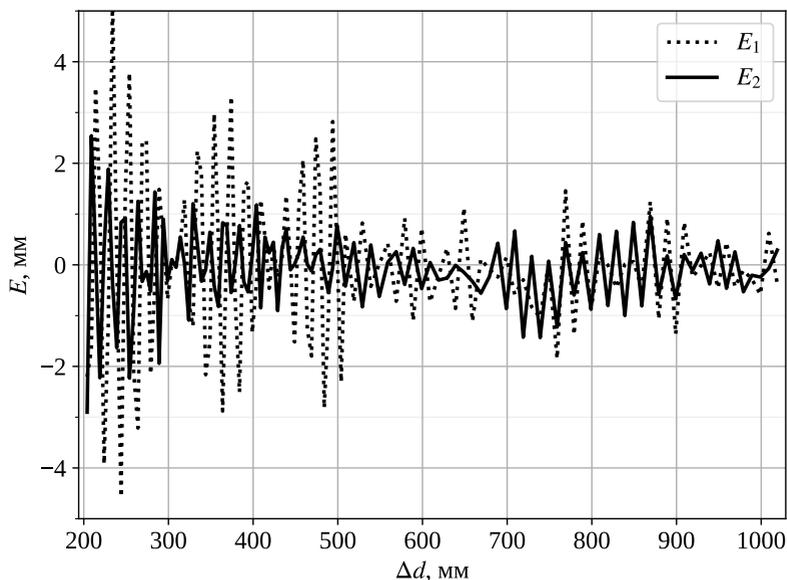


Рисунок 3 — Ошибка вычисления частотных составляющих экспериментально полученных сигналов биений

модели с двумя синусоидальными составляющими позволило уменьшить максимальную погрешность, вызванную помехой, в 1,8 раза. При обработке сигнала учитывались обе спектральные составляющие, что позволило оценить расстояние как до основного отражателя, так и до помехи. Сравнение погрешности с полученной при обработке тестовых сигналов при уровне шума, эквивалентном экспериментальному, позволяет сделать заключение, что основным источником погрешности являлись искажения сигнала, а не аддитивный шум.

Вторая глава посвящена теоретическому обоснованию и численной реализации алгоритма оптимального по норме Ганкеля приближения многокомпонентной функции. С этой целью представлено конструктивное доказательство ранее известного обобщения теоремы Адамяна—Арова—Крейна. Затем развита вычислительная реализация сингулярного разложения бесконечной матрицы Ганкеля, применяемая для аппроксимации рациональных функций с полюсами

произвольного порядка. В рамках теории операторов Ганкеля функции на комплексной плоскости $\rho(z)$ сопоставляется оператор Ганкеля

$$\rho(z) = \sum_{k=-1}^{-\infty} \rho_k z^k \iff \mathbf{H}_\rho = \begin{bmatrix} \rho_{-1} & \rho_{-2} & \rho_{-3} & \cdots \\ \rho_{-2} & \rho_{-3} & \cdots & \\ \rho_{-3} & \cdots & & \\ \vdots & & & \end{bmatrix},$$

при этом рациональной ρ соответствует \mathbf{H}_ρ конечного ранга. Норма $\|\mathbf{H}_\rho\|$ даёт оценку максимума модуля $\rho(z)$ на единичной окружности $\|z\| = 1$. Сингулярные числа \mathbf{H}_ρ количественно характеризуют ошибки рационального приближения для функции $\rho(z)$, а сингулярные векторы \mathbf{H}_ρ позволяют вычислить рациональную аппроксимацию, порядок которой совпадает с номером соответствующего сингулярного числа. Можно провести параллель с методом MUSIC, основанным на вычислении собственных значений автокорреляционной матрицы, причём малые собственные значения предполагаются вызванными аддитивным шумом. Однако разработанный алгоритм не требует оценки автокорреляционной матрицы сигналов, что снижает требуемое число отсчётов сигнала. Кроме того, математические свойства оптимального по норме Ганкеля приближения обеспечивают равенство его порядка выбранному пользователем без дополнительного шага отбрасывания части полюсов.

Изложенное обобщение ставит в соответствие многокомпонентной функции $\rho = [\rho_1, \dots, \rho_{K_L}]$ векторный оператор \mathbf{H}_ρ .

Разработан алгоритм сингулярного разложения \mathbf{H}_ρ конечного ранга, и получены явные выражения для рациональной аппроксимации ρ заданного порядка на основе сингулярных векторов \mathbf{H}_ρ .

Так как основанный на теории операторов Ганкеля алгоритм вычисляет оптимальное приближение модели сигнала максимального порядка, предлагается модификация метода Писаренко, позволяющая количественно оценить не только частоты, но и амплитуды сигнала, состоящего из незатухающих синусоид и шума. Модифицированную модель Писаренко можно представить в виде суммы элементарных дробей

$$\phi(z) = \sum_{m=1}^M w_m \frac{1 - |d_m|^2}{|z - d_m|^2} = \sum_{m=1}^M w_m \left(\frac{d_m}{z - d_m} + \frac{1}{1 - \bar{d}_m z} \right), \quad (3)$$

$|d_m| < 1$. Каждое из M слагаемых весовой функции (3) добавляет к смоделированным отсчётам вектор $w_m \mathbf{d}_m$:

$$\mathbf{d}_m = \left[d_m^{M-1}, d_m^{M-2}, \dots, d_m, 1, \bar{d}_m, \dots, \bar{d}_m^M \right],$$

при этом веса w_m подбираются методом наименьших квадратов. Эффективность модификации продемонстрирована анализом тестового сигнала с четырьмя частотами, взятого из литературы по спектральному анализу. Известные значения

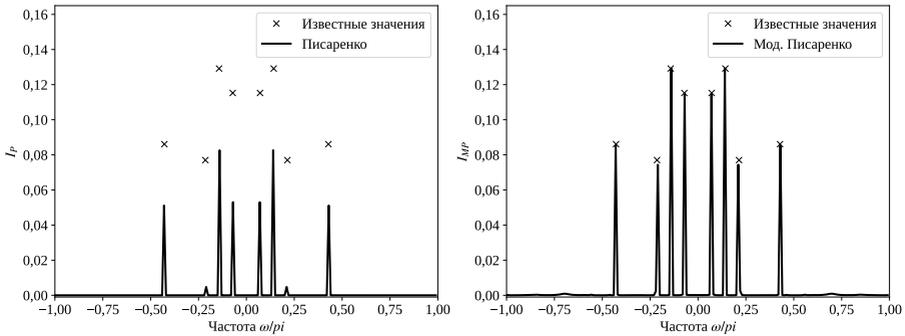


Рисунок 4 — Сравнение обычной и модифицированной моделей Писаренко

частот показаны маркерами "x". Использованы 64 отсчёта, так что модель Писаренко имела 32 полюса. На левом графике рисунка 4 показана амплитуда модели Писаренко на единичной окружности. Она получена на основе сигнала без добавленного шума, так что отклонения амплитуд от истинных значений обусловлены ограничениями самой модели. С другой стороны, модифицированная модель Писаренко количественно отражает не только частоты, но и амплитуды спектральных составляющих, хотя она вычислена на основе отсчётов с добавлением шума.

Изложенные методы составляют теоретическую основу для приложений к задаче оценки общих частотных составляющих набора сигналов, одновременно измеренных массивом приёмных устройств. Так как важным нововведением второй главы является вычислительная реализация многокомпонентного оптимального приближения, его эффективность продемонстрирована путём обработки общедоступного набора экспериментальных данных. Показано, что обработка новым алгоритмом выборок сигналов, зарегистрированных массивом ненаправленных микрофонов, позволяет сократить более чем в пять раз объём данных, необходимых для точного определения направления на источник звука. Алгоритм сохранил свою точность и в том случае, когда к экспериментальным данным, записанным в безэховой камере, был добавлен псевдослучайный нормально распределённый шум.

Третья глава исследует методы синтеза цифровых фильтров и банков фильтров методом редукции порядка передаточной функции. Вначале изложен основанный на оптимизации метод расчёта фильтра высокого порядка, служащего «эталонным». Затем методы второй главы используются для выбора наименьшего порядка, при котором АЧХ оптимального фильтра будет достаточно близка к «эталону». Синтез решения заданного порядка даётся алгоритмом построения аппроксимации, также изложенным в главе 2. Примером для демонстрации работы алгоритмов служит вычисление одномодового и двухмодового гауссова моделирующего фильтра. Разработанное многокомпонентное обобщение оптимального по норме Ганкеля приближения применено к задаче разработки банка полосовых БИХ-фильтров, предназначенного для разбиения

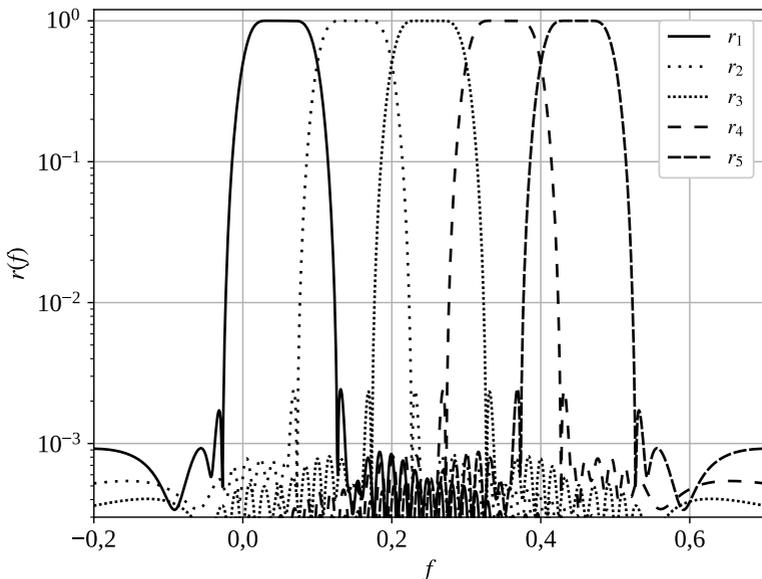


Рисунок 5 — Амплитудные характеристики фильтров оптимизированного банка

сигнала на пять смежных полос в интервале $f = \omega/\pi \in [0, 0.5]$, каждая из полос шириной $\Delta f = 0.1$ (в единицах относительно частоты Найквиста—Котельникова). В качестве «эталонного» фильтра скомпонованы 5 полосовых КИХ-фильтров порядка 128, разработанных с использованием оконного метода, то есть произведения импульсной характеристики прямоугольного окна на окно Хемминга. Сингулярные числа оператора H_p свидетельствуют, что для приближения эталонного фильтра с погрешностью менее 10^{-3} потребуется 35 полюсов ($s_{35} = 9.162 \times 10^{-4}$). Амплитудные характеристики фильтров, составляющих банк, полученный в результате ААК-процедуры, показаны на рисунке 5. Максимальное по амплитуде отклонение от «эталонного» банка

$$\max_{k,f} |r_k(f) - \rho_k(f)| = 9.64 \times 10^{-4}$$

близко к сингулярному значению, как и ожидалось. Это отклонение сравнимо по абсолютной величине с несовершенствами «эталонного» фильтра и поэтому им можно пренебречь. Число «детерминированных» (лежащих внутри единичной окружности) полюсов равно номеру сингулярного значения, в согласии с теоремой ААК.

Все фильтры оптимизированного банка разделяют общий набор полюсов, в то же время имея разные коэффициенты знаменателя (нули передаточной функции). В то время как на фильтр приходится семь полюсов, каждый фильтр

использует все тридцать пять. Это позволяет получить точную аппроксимацию, используя меньшее число полюсов.

В **заключении** приведены следующие основные результаты работы.

1. На основе рассмотрения существующих реализаций алгоритмов спектрального анализа наименьших квадратов первая глава предлагает модификации «жадного» алгоритма ортогонального согласованного сопоставления. Использование критерия пошаговой регрессии для добавления новой частоты в параметрическую модель способствует более точной идентификации недостающих составляющих. Дополнительный шаг градиентного уточнения модели позволяет устранить ошибки, вызванные недостаточной размерностью на предыдущих шагах. Данные изменения обеспечили возможность точного описания сигналов параметрической моделью более низкого порядка. На тестовом сигнале удалось снизить требуемый ранг модели в три раза по сравнению с методом ортогонального согласованного сопоставления.
2. Получены и подтверждены численным моделированием аналитические выражения границы Крамера—Рао дисперсии оценки действительного сигнала с единственной частотой, справедливые, в отличие от ранее известных, для частот вблизи нуля и частоты Котельникова.
3. Применение новой реализации САНК для анализа сигналов радиочастотного уровнемера при наличии мешающих отражений снижает систематическую погрешность в 1,8 раза.
4. Во второй главе предложены математическое обоснование и численные методы реализации оптимального по норме Ганкеля приближения многокомпонентной функции. Более общая формулировка вычислительных методов сделала возможным применение оптимального приближения к рациональным функциям, имеющим полюса произвольного порядка. Изложенные алгоритмы применяются для оценки частотных составляющих полигармонических сигналов. Их эффективность в присутствии шума подтверждена результатами обработки как вычисленных, так и полученных экспериментально радиотехнических сигналов.
5. Третья глава использует обоснованные в предыдущей главе методы для проектирования цифровых фильтров с бесконечной импульсной характеристикой, а также их банков. Совместная оптимизация по норме Ганкеля составляющих банк фильтров позволила на порядок улучшить согласие с требуемой амплитудно-частотной характеристикой по сравнению с отдельно оптимизируемыми фильтрами.

Публикации автора по теме диссертации

1. *Кагаленко, М. Б.* Точность оценки частоты гармонического сигнала методом нелинейных наименьших квадратов [Текст] / М. Б. Кагаленко // Цифровая обработка сигналов. — 2012. — Т. 1. — С. 76—80. — (0,63 п. л.)

2. *Кагаленко, М. Б.* Обнаружение запараллеливания питающих фидеров энергетической подстанции путём непрерывного наблюдения [Текст] / М. Б. Кагаленко // Вестник Рязанского радиотехнического университета. — 2013. — Т. 46, № 4. — С. 112—115. — (0,5 п. л.)
3. *Кагаленко, М. Б.* Оценка параметров синусоидального сигнала при линейной амплитудной модуляции [Текст] / М. Б. Кагаленко // Вестник Рязанского радиотехнического университета. — 2015. — Т. 54, № 4. — С. 60—64. — (0,5 п. л.)
4. *Кагаленко, М. Б.* Оценка частот полигармонического сигнала методом редукции порядка параметрической модели [Текст] / М. Б. Кагаленко // Вестник Рязанского радиотехнического университета. — 2018. — Т. 63, № 1. — С. 14—19. — (0,75 п. л.)
5. *Israeloff, N. E.* Can Zipf distinguish language from noise in noncoding DNA? [Text] / N. E. Israeloff, M. Kagalenko, K. Chan // Physical Review Letters. — 1996. — Vol. 76, no. 11. — P. 1976.
6. *Kagalenko, M.* Comparison of backpropagation and synthetic aperture imaging algorithms for processing GPR data [Text] / M. Kagalenko, W. Weedon // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (Digest). Vol. 3. — 1996. — P. 2179—2182.
7. *Kagalenko, M.* Optimal in the Hankel norm reduction of digital IIR filter order [Text] / M. Kagalenko // 2016 5th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO 2016) / ed. by L. Jozwiak, R. Stojanovic, B. Lutovac. — 06/2016. — P. 251—255.
8. *Kagalenko, M.* Iterative procedure for estimating frequency components of a polyharmonic signal [Text] / M. Kagalenko // 2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO 2017) / ed. by R. Stojanovic [et al.]. — 06/2017. — P. 221—225.
9. *Kagalenko, M.* Variance of the nonlinear least squares estimate of the frequency separation of two complex exponents [Text] / M. Kagalenko // 2014 3rd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO 2014) / ed. by R. Stojanović, L. Jóźwiak, D. Jurišić. — Institute of Electrical, Electronics Engineers Inc., 06/2014. — P. 135—139.
10. The application of advanced processing technique to the triad of precision laser gyroscopes [Text] / A.V. Molchanov, V.A. Belokurov, M.V. Chirkin, M.B. Kagalenko [et al.] // 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2016 - Proceedings / ed. by P. V.G. — 06/2016. — P. 120—122.
11. *Kagalenko, M.* Modified Pisarenko spectrum for frequency analysis [Text] / M. Kagalenko // 2018 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO 2018) / ed. by L. Jozwiak [et al.]. — 06/2018. — P. 221—225.

12. *Kagalenko, M.* Multicomponent Optimal in the Hankel Norm Order Reduction for Design of the Digital Filter Banks [Text] / M. Kagalenko // 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO 2019). — 06/2019. — P. 497—501.
13. *Belokurov, V.* The use of Characteristic Functions in the Multi-Frame Accumulation Algorithm [Text] / V. Belokurov, V. Koshelev, M. Kagalenko // 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO 2019). — 06/2019. — P. 256—261.
14. *Кагаленко, М. Б.* Оценка частоты синусоидального сигнала при возможном наличии амплитудной модуляции [Текст] / М. Б. Кагаленко // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь). — 2015. — С. 1196—1197.
15. *Кагаленко, М. Б.* Точность оценки частоты гармонического сигнала методом нелинейных наименьших квадратов [Текст] / М. Б. Кагаленко // XVI Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых учёных и специалистов. — Рязанский государственный радиотехнический университет, 11.2011. — С. 46—48.
16. Способ обнаружения несанкционированного запараллеливания фидеров распределительных подстанций на стороне потребителя и устройство для его осуществления [Текст] : пат. 2520163С2 Рос. Федерация : МПК G01R 19/00 (2006.01) / П.К. Веселов, А.Ю. Змазнова, М.Б. Кагаленко [и др.] ; заявитель ОАО «Межрегиональная распределительная сетевая компания Центра и Поволжья» (RU). — № 2012143238/28 ; заявл. 09.10.2012 ; опубл. 20.06.2014, Бюл. № 17. — 8 с. : ил.
17. Программно-аппаратный комплекс мониторинга состояния воздушных линий электропередач [Текст] : пат. 174052U1 Рос. Федерация : МПК G01C 11/06 (2006.01) / В.И. Кошелев, Е.С. Штрунова, М.Б. Кагаленко [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО РГРТУ (RU). — № 2015157300 ; заявл. 30.12.2015 ; опубл. 27.09.2017, Бюл. № 27. — 7 с. : ил.

Кагаленко Михаил Борисович

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ЧАСТОТНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ
ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать _____.____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Типография Рязанского государственного радиотехнического университета
им. В.Ф. Уткина

г. Рязань, 390005, ул. Гагарина, 59/1

Редакционно—издательский центр