

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель

генерального директора ФГУП НИИР

К.т.н. М.Ю. Сподобаев



## ОТЗЫВ

ведущей организации – Федеральное государственное унитарное предприятие «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева» на диссертацию Поборчей Натальи Евгеньевны на тему «Разработка эффективных методов и алгоритмов оценивания параметров канала связи в условиях априорной неопределенности», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

### 1. Актуальность темы исследования

В настоящее время возросли технические требования к аппаратуре связи (рост скорости передачи информации, количества абонентов сетей сотовой связи), поэтому остро стоит задача понижения стоимости оборудования, предназначенного для гражданского использования. Этого можно достичь, применяя приемник прямого преобразования, который обладает простой конструкцией. Но платить за данное достоинство приходится усложнением программного решения проблем, характерных для такого способа приема. К недостаткам приемника прямого преобразования относятся искажения, возникающие у сигнала, такие как амплитудный и фазовый дисбаланс между квадратурами сигнала, дрейф постоянных составляющих, а также сдвиг частоты, возникающий из-за несоответствия частот гетеродина и принимаемого процесса. Перечисленные искажения влияют на помехоустойчивость системы связи, особенно, если используются сигналы с большим количеством позиций (64-QAM, 256-QAM, 1024-QAM и

Вход. № 115/21  
«30» 08 2021 г.  
подпись *М.Ю. Сподобаев*



т.д.) или (и) применяется технология MIMO. Поэтому задача оценивания перечисленных искажений и их компенсация является актуальной для обеспечения надежной связи.

Повышение помехоустойчивости возможно получить за счет увеличения точности оценивания параметров канала связи, что влечет за собой усложнение алгоритмов обработки сигналов. Недостаток априорных сведений, который всегда присутствует в реальной ситуации, тоже может приводить к увеличению количества арифметических операций в процедурах оценивания. Таким образом, создание алгоритмов совместного оценивания неизвестных параметров канала связи и искажений сигнала в тракте приемника прямого преобразования с удовлетворительной вычислительной сложностью, также актуально.

## **2. Структура и основные результаты работы**

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и четырех приложений.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и решаемые задачи, указаны научная новизна и значение полученных соискателем результатов для практики, представлены сведения о структуре работы и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой** главе диссертации приведен обзор методов и алгоритмов оценки неизвестных параметров сигнала и канала связи. Также рассмотрены известные методы оценивания искажений, приобретенных сигналом в тракте приемника прямого преобразования для систем SISO и MIMO.

**Вторая** глава диссертации посвящена синтезу регуляризирующего метода совместной оценки параметров канала связи в условиях априорной неопределенности относительно законов распределения шумов, основанный на факторизации нелинейной функции уравнения наблюдений и модифицированного функционала Тихонова А.Н. Предложенная формула вычисления регуляризирующего параметра снимает необходимость подбирать его эмпирически. Частным случаем синтезированного метода является нелинейная фильтрация. Проведена оценка вычислительной сложности, предложенного метода: количество арифметических операций для регуляризирующего алгоритма  $\propto nM_0, M_0 \leq n$ , для нелинейной фильтрации  $\propto n$ , где  $n$  - объем выборки обрабатываемого сигнала,  $M_0$  - количество итераций алгоритма.



В **третьей** главе на основе предложенного регуляризирующего метода совместного оценивания параметров канала, разрабатываются новые алгоритмы фазовой и тактовой синхронизации сигналов MSK, PSK и QAM. Учитываются частота, оставшаяся от снятия несущей, задержка сигнала, возникающая при работе генератора тактовой синхронизации, фаза сигнала, обусловленная фазами генераторов на передающей и приемной стороне с учетом фазового шума и задержкой в канале распространения. В качестве аппроксимирующей конструкции нелинейной функции уравнения наблюдений сигнала MSK используется ряд Тейлора первого и второго приближения, для PSK, QAM – первого приближения. В моделях сигналов PSK, QAM присутствует вещественный импульс, частотная характеристика которого имеет вид «приподнятого косинуса». Он позволяет найти начальную оценку задержки методом статистического усреднения по времени.

При неизвестной импульсной характеристике канала для сигналов PSK, QAM оценке подлежат амплитуды основного импульса сигнала и нескольких «хвостов», образующих межсимвольную интерференцию, а также частота и фаза сигнала.

Для регуляризирующего алгоритма вычислительный эксперимент на ЭВМ показал, что введение в функционал Тихонова А.Н. множителя Лагранжа позволяет получать удовлетворительную точность оценки параметров при малых количествах итераций (10-20) алгоритма.

Проведено сравнение синтезированных алгоритмов по точности оценивания с известной процедурой нелинейной фильтрации Стратоновича. Показано, что точность оценивания частоты MSK сигнала у нелинейной фильтрации со вторым приближением по Тейлору выше в 1.5 – 2 раза, чем у известной процедуры с первым приближением (метод Стратоновича), если длина тестового сигнала 18000 символов; новый регуляризирующий алгоритм достигает сравнимой с ними точности при объеме выборки тестовой последовательности в 18 раз меньше. Для сигнала 64-QAM предложенные алгоритмы при длине тестового сигнала в 2000 символов имеют точность оценивания частоты выше в 2.4– 4 раза, чем процедура Стратоновича.

В **четвёртой** главе автором синтезированы новые алгоритмы совместного оценивания параметров канала и искажений сигналов PSK, QAM в тракте приемника прямого преобразования в канале без замираний и в канале с доплеровским расширением спектра и релеевскими замираниями для систем SISO и проведено сравнение их с известными процедурами оценивания. Под искажениями понимались амплитудно-фазовый дисбаланс



между квадратурами сигнала, дрейф постоянных составляющих, сдвиг частоты.

Для канала без замираний энергетический выигрыш у предложенных алгоритмов от 2 до 4 дБ перед известными процедурами отдельной оценки параметров и при одинаковой эффективности они обладают меньшей вычислительной сложностью ( $\propto nM_0, M_0 \leq n$ ) относительно известного совместного алгоритма оценивания ( $\propto n^3$ ).

Для канала с доплеровским расширением спектра и релеевскими замираниями предложен алгоритм совместной оценки параметров на основе полиномиальной аппроксимации канала. Такой подход позволяет создать линейную модель и упростить алгоритм оценивания. Все время наблюдения сигнала разбивается на несколько интервалов, в течение которых тестовая последовательность длиной  $m$  используется один раз. На каждом таком интервале сначала происходит оценка параметров сигнала по тестовой последовательности, затем осуществляется экстраполяция опорного процесса и детектирование информационных символов, далее по ним происходит оценивание параметров, потом опять экстраполяция и детектирование. Проведена оценка вычислительной сложности: количество арифметических операций пропорционально  $m$ . Предложенный алгоритм проще в 13 раз известной процедуры оценивания, основанной на тригонометрической аппроксимации.

**В пятой** главе проведено исследование влияния априорной неопределенности относительно помех и шумов на работу разработанных алгоритмов.

Проанализирована работа регуляризующего алгоритма, и процедуры нелинейной фильтрации на фоне негауссовских шумов при разном модели фазового шума. В качестве аддитивных шумов и помех взяты нормально распределенный шум, коррелированный шум и квазидетерминированная узкополосная помеха. Проведен анализ помехоустойчивости предложенных алгоритмов при разном длине тестовой и информационной последовательности. При рассмотренных условиях осуществлено сравнение представленных алгоритмов с известной процедурой совместного оценивания. Показано, что регуляризующий алгоритм выигрывает в энергетической эффективности перед известной процедурой совместного оценивания до 1.5 дБ при информационной последовательности в 7 раз длиннее тестовой.

Также для синтезированных алгоритмов методом, предложенным в главе 2, проведен анализ влияния априорной неопределенности относительно



дисперсии аддитивного шума при разных его моделях. Эксперимент показал, что алгоритм нелинейной фильтрации более чувствителен к отклонениям значения дисперсии от истинных, чем регуляризирующая процедура.

**В шестой** главе автор провел синтез и анализ новых алгоритмов совместного оценивания канала и искажений сигнала в приемнике прямого преобразования для систем с MIMO с  $N$  передающими и приемными антеннами. Разработка алгоритмов осуществляется на основе метода, предложенного в главе 2 и метода с использованием полиномиальной аппроксимации, описанного в главе 4. Показано, что регуляризирующий алгоритм в сочетании с процедурой, основанной на полиномиальной аппроксимации матрицы канала, обладает практически такой же помехоустойчивостью, что и известная процедура совместного оценивания, но обладает более низкой вычислительной сложностью: количество арифметических операций у предложенного алгоритма  $\propto mM_0$ ,  $M_0 \leq m$ , а у известной процедуры  $\propto m^3$ , где  $m$  - длина тестовой последовательности,  $M_0$  - количество итераций.

**Седьмая** глава посвящена синтезу (на основе методов главы 2 и 4 с полиномиальной аппроксимацией) и анализу новых алгоритмов совместного оценивания канала и искажений сигнала в приемнике прямого преобразования в системе с OFDM. Показано, что предложенные алгоритмы выигрывают в помехоустойчивости до 7 дБ перед известной процедурой раздельной оценки, работающей также по двум опорным OFDM символам. При переходе от приема 28 к 40 символам OFDM комбинирование алгоритма, использующего полиномиальную аппроксимацию, с процедурой Стратоновича дает потерю в энергетической эффективности до 7 дБ, а при использовании регуляризирующего алгоритма потери составляют до 3 дБ. Таким образом, выигрыш у регуляризирующей процедуры относительно метода Стратоновича составляет до 4 дБ.

**В заключении** сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

### **3. Научная новизна работы.**

Научная новизна работы заключается в:

1. **Новом** рекуррентном регуляризирующем методе совместной оценки параметров канала связи в условиях априорной неопределенности относительно динамической системы и распределения шумов, позволяющем с единых позиций решать, как линейные, так и нелинейные задачи с разными аппроксимирующими конструкциями.



2. **Новом** приближенном рекуррентном выражении в замкнутом виде для апостериорного нахождения параметра регуляризации, основанном на априорных данных относительно дисперсии аддитивного шума, позволяющем повысить точность оценивания при ограниченных выборках сигнала.
3. **Новом** методе совместной оценки нестационарного канала и параметров сигнала в условиях априорной неопределенности относительно статистических характеристик канала связи и законов распределения шумов, работающем как по тестовой, так и по информационной последовательности после детектирования, основанном на полиномиальной аппроксимации невысокого порядка внутри временного скользящего окна и линейном МНК, обладающем вычислительной сложностью, линейно зависящей от объема выборки сигнала.
4. **Новых**, основанных на методе в п. 1, рекуррентных алгоритмах совместной оценки параметров канала связи для задач фазовой и тактовой синхронизации, а также для компенсации искажений, вносимых приемником прямого преобразования, работающих как по тестовой последовательности, так и по информационным символам после процедуры детектирования в системах с SISO, позволяющих сократить длину тестовой последовательности и повысить точность оценивания.
5. **Новых**, основанных на методах п. 1 и 3, для систем с MIMO алгоритмах (рекуррентных и не рекуррентных, комбинированных) совместной оценки матрицы канала связи и искажений, вносимых приемником прямого преобразования, позволяющих понизить сложность по сравнению с известными методами совместного оценивания.
6. **Новых**, основанных на методах п. 1 и 3 для систем с OFDM алгоритмах совместной оценки параметров канала связи и искажений сигнала в тракте приемника прямого преобразования, работающих во временной области и позволяющих повысить точность оценивания или понизить вычислительную сложность относительно известных процедур

4. **Теоретическая значимость** диссертационной работы заключается в синтезе методов совместного оценивания параметров канала связи в условиях априорной неопределенности относительно статистических



характеристик канала связи и законов распределения шумов и в разработке на их основе алгоритмов оценивания, работающих, как по тестовой последовательности, так и по информационной после процедуры детектирования.

**5. Практическая значимость** результатов диссертационной работы заключается в том, что разработанные в диссертации в условиях априорной неопределенности на фоне фазового и аддитивного шумов

- алгоритм нелинейной фильтрации для совместной оценки задержки, частоты и фазы сигнала MSK, использующий второе приближение по Тейлору при аппроксимации нелинейных функций уравнения наблюдений, который при некоторых отношениях сигнал/шум позволяет сократить длительность переходного процесса до 2 раз и повысить точность оценивания частоты при наличии фазового шума в 1.5 – 2 раза относительно известного алгоритма Стратоновича; показана возможность его реализации в реальном времени;
- регуляризирующий алгоритм совместной оценки задержки, частоты и фазы сигналов MSK, PSK, QAM, который позволяет сократить длину тестовой последовательности в 3-18 раз и повысить точность оценивания частоты и фазы в 3 и 4 раза соответственно относительно известного алгоритма Стратоновича;
- регуляризирующий алгоритм совместной оценки амплитуды, фазы, частоты, амплитудно-фазового дисбаланса и постоянных составляющих сигналов PSK, QAM для системы SISO в условиях стационарного канала, более устойчивый к неточности априорных сведений относительно дисперсии аддитивного шума, чем известный алгоритм Стратоновича, позволяющий сократить длину тестовой последовательности и получить энергетический выигрыш до 4 дБ относительно известных процедур оценивания;
- алгоритм совместной оценки во временной области параметров канала и искажений сигнала в тракте приемника прямого преобразования для системы с OFDM, основанный на комбинировании процедуры с полиномиальной аппроксимацией с регуляризирующим алгоритмом, работающий по двум опорным символам, который позволяет совместить операции оценки и интерполяции множителей канала, а также обладает вычислительной сложностью, пропорциональной квадрату от объема выборки тестового сигнала, что ниже, чем известный алгоритм совместного оценивания (сложность пропорциональна третьей степени от объема выборки), и выигрывает в помехоустойчивости перед известной процедурой на основе статистического усреднения до 7 дБ;



- алгоритм совместного оценивания матрицы канала и искажений сигнала в приемнике прямого преобразования для системы с ММО, основанный на комбинировании процедуры, использующей полиномиальную аппроксимацию с новым рекуррентным регуляризирующим алгоритмом, который при единой постановке задачи и одинаковой помехоустойчивости обладает гораздо более низкой вычислительной сложностью, чем известный алгоритм совместного оценивания параметров;

- алгоритм оценивания множителей канала в условиях априорной неопределенности относительно статистических характеристик канала с доплеровским расширением спектра и релеевскими замираниями и искажений сигнала в приемнике прямого преобразования, основанный на полиномиальной аппроксимации канала, обладающий более низкой вычислительной сложностью, чем известные процедуры совместного оценивания.

#### **6. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.**

Достоверность проведенных соискателем научных положений, исследований, результатов и выводов подтверждается аргументированностью и доказательностью предложенных алгоритмов, корректностью применения математического аппарата и результатами вычислительного эксперимента, которые не противоречат выводам отечественных и зарубежных ученых, опубликованных в ведущих научно-технических журналах, а также широким обсуждением результатов диссертации на международных и российских конференциях.

#### **7. Личный вклад автора.**

Все выносимые на защиту результаты и положения, составляющие основное содержание диссертационной работы, разработаны и получены автором лично.

#### **8. Соответствие работы заявленной специальности.**

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (п. 4 «Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки радиосигналов в радиосистемах телевидения и связи при наличии помех. Разработка методов разрушения и защиты информации»).

#### **9. Апробация результатов работы.**

Диссертационная работа обсуждалась со специалистами в сфере радиотехники, радиосвязи и телекоммуникаций на международных и российских конференциях. Уровень апробации результатов диссертации, а



также полнота их отражения в публикациях в отечественных периодических научных изданиях представляются вполне достаточными и удовлетворяют требованиям Положения о присуждении ученых степеней. Материалы диссертационной работы были обсуждены на 18 научных конференциях, из них 5 входят в международную базу Scopus. Результаты диссертационной работы были опубликованы в журналах (26 работ), из них 18 из Перечня ВАК, 2 публикации входят в Web of Science; получено 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

#### **10. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.**

Основные положения, результаты и выводы диссертационной работы рекомендуется использовать при разработке устройств фазовой синхронизации и обработки сигналов в системах связи с приемником прямого преобразования.

#### **11. Замечания по диссертационной работе**

1. Автор рассматривает искажения сигнала в тракте приемника прямого преобразования только как постоянные параметры. Не рассмотрен частотно зависимый амплитудно-фазовый дисбаланс.
2. Для оценки параметров канала с доплеровским расширением спектра и релеевскими замираниями исследован алгоритм с полиномиальной аппроксимацией только первого и второго порядка. Нет анализа использования порядка аппроксимирующей модели от скорости изменения канала.
3. Не исследована минимально возможная длина тестового сигнала, при которой предложенные алгоритмы обеспечивают удовлетворительную помехоустойчивость.
4. Не показана возможность реализации синтезированных алгоритмов оценивания параметров канала связи и искажений сигнала в приемнике прямого преобразования на современной схемотехнической базе. Приведен только пример использования довольно старого процессора TMS320C645.
5. Для систем связи с MIMO не рассмотрен анализ работы предложенных алгоритмов оценивания при количестве передающих и приемных антенн больше 8.
6. Для систем с OFDM рассматривалась только модель канала связи в виде расширенной модели движения пешехода (EPA). Не анализировались



предложенные алгоритмы в условиях модели канала связи для движения автомобиля в городских условиях.

7. В работе имеются опечатки на стр. 60, 69, 235.

## **12. Общее заключение по работе**

Выше приведённые замечания не снижают ценность и общую положительную оценку выполненного диссертационного исследования. Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, и имеет значение для развития систем связи. Работа написана на хорошем научном уровне. Автореферат диссертации достаточно полно и корректно отражает содержание исследования. В автореферате четко сформулированы цель исследования, научная задача, основные положения и выводы. Диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям ВАК при Минобрнауки России, предъявляемым к квалификационным работам на соискание ученой степени доктора технических наук и соответствует пункту 4 паспорта специальности 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения. Автор диссертации, Поборчая Наталья Евгеньевна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по указанной специальности 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Отзыв подготовили:

Веерпалу Вячеслав Эннович, доктор технических наук, 20.02.01 - «Теория вооружения, военно-техническая политика, системы вооружения», начальник центра, Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт радио» (ФГУП НИИР), Казакова ул., д. 16, г. Москва, 105064, Россия, тел.: +7 (499) 261-05-05, e-mail: [veerpalu@niir.ru](mailto:veerpalu@niir.ru).


Кокошкин Игорь Валентинович, кандидат технических наук, доцент, 05.12.13 - «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», начальник центра, Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт радио» (ФГУП НИИР), Казакова ул., д. 16, г. Москва, 105064, Россия, тел.: +7 (499) 261-02-07, email: [ivk@niir.ru](mailto:ivk@niir.ru).

Диссертация, автореферат и отзыв на диссертацию обсуждены на заседании научно-технического совета ФГУП НИИР (протокол заседания НТС № 3/2-П-2021 от 19 июля 2021 г.).



Начальник центра


ФГУП НИИР, д.т.н.

  
В.Э. Веерпалу

«23» августа 2021 г.

Начальник центра

ФГУП НИИР, к.т.н., доцент

  
И.В. Кокошкин

«23» августа 2021 г.

Подписи В.Э. Веерпалу, И.В. Кокошкина заверяю.

Директор службы персонала ФГУП НИИР



  
В.А. Тютюнова

«2» августа 2021 г.