

## ОТЗЫВ

официального оппонента **Тихомирова Николая Михайловича** на диссертацию **Поборчей Натальи Евгеньевны** на тему «**Разработка эффективных методов и алгоритмов оценивания параметров канала связи в условиях априорной неопределенности**» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

### **Актуальность темы диссертационного исследования.**

Прием цифровой информации немислим без устройств фазовой и тактовой синхронизации, а также компенсации искажений сигнала, приобретенных в канале связи. Современные тенденции развития систем связи требуют снижения стоимости аппаратуры, которое возможно при использовании приемника прямого преобразования. Но при таком способе приема возникают дополнительные искажения (сдвиг частоты, амплитудно-фазовый дисбаланс между квадратурами сигнала, дрейф постоянных составляющих), которые вместе с искажениями канала связи приводят к понижению помехоустойчивости приема информации или делают прием сигнала невозможным. Решение задачи синхронизации и компенсации искажений связаны с определением неизвестных параметров канала и сигнала. Чем точнее будут произведены их оценки, тем выше в итоге будет помехоустойчивость системы. Важную роль также играет вычислительная сложность алгоритмов оценивания неизвестных параметров. Снижение количества арифметических операций дает возможность реализовать полученные алгоритмы на более дешевой базе. Вклад в помехоустойчивость и сложность, кроме непосредственно процедуры нахождения оценки, вносит еще и количество имеющейся априорной информации. При неизвестных законах распределения шумов синтез оптимального алгоритма оценивания неизвестных параметров канала и сигнала по критерию минимума средней квадратической ошибки или по критерию максимального правдоподобия



требует процедуры идентификации плотностей распределения вероятности случайных процессов, что увеличивает вычислительную сложность. Обзор известных методов и алгоритмов показал, что при относительно коротких тестовых сигналах либо присутствует высокая точность оценивания неизвестных параметров канала связи, но при этом высокая вычислительная сложность, либо простота и существенно более низкая точность. Поэтому задача, решенная в диссертационной работе: в условиях априорной неопределенности повышение помехоустойчивости приема информации при удовлетворительной сложности алгоритмов обработки сигнала, является актуальной.

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены следующие новые результаты: в условиях априорной неопределенности относительно распределения шумов

1. предложен новый регуляризирующий метод совместной оценки параметров канала связи, позволяющий решать, линейные и нелинейные задачи с разными аппроксимирующими конструкциями, повысить точность оценивания при ограниченных выборках сигнала за счет рекуррентного определения параметра регуляризации по полученной формуле в замкнутом виде;

2. при неизвестных статистических характеристиках канала связи с доплеровским расширением спектра и релеевскими замираниями предложен новый метод совместной оценки параметров канала связи и сигнала, работающий как по тестовой, так и по информационной последовательности после детектирования, обладающий вычислительной сложностью, линейно зависящей от объема выборки сигнала;

3. для систем с SISO на основе метода, предложенного в п 1, синтезированы новые рекуррентные алгоритмы совместной оценки параметров канала связи для задач фазовой и тактовой синхронизации, а также для компенсации искажений, вносимых приемником прямого

преобразования, позволяющие сократить длину тестовой последовательности и повысить точность оценивания;

4. для систем с MIMO на основе методов, предложенных в п. 1 и 2, синтезированы новые алгоритмы совместной оценки матрицы канала связи и искажений сигнала в приемнике прямого преобразования, которые позволяют понизить сложность по сравнению с известными методами совместного оценивания;

5. для системы с OFDM на основе предложенных методов в п. 1 и 2 во временной области синтезированы новые алгоритмы совместной оценки параметров канала связи и искажений сигнала в приемнике прямого преобразования, позволяющие повысить точность оценивания или понизить вычислительную сложность относительно известных процедур.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается обзором и анализом методов, используемых для оценивания параметров канала связи и искажений, полученных сигналом в тракте приемника прямого преобразования, проведенными исследованиями, основанными на методах теории вероятностей, математической статистики, нелинейной рекуррентной фильтрации, методе наименьших квадратов, теории регуляризации для решения некорректно поставленных задач и статистического моделирования, а также положительными результатами внедрения на предприятиях.

**Достоверность результатов.** Достоверность полученных результатов диссертации подтверждается вычислительным экспериментом, результаты которого не противоречат теории оценивания и рекуррентной фильтрации, выводам отечественных и зарубежных ученых, опубликованным в ведущих научно-технических журналах, а также широким обсуждением результатов диссертации на международных и российских конференциях.



## **Теоретическая и практическая значимость результатов исследования.**

Теоретическая значимость 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.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в повышении точности оценивания неизвестных параметров канала и искажений сигнала в приемнике прямого преобразования, что позволяет получить энергетический выигрыш до 4 дБ перед известными методами оценивания, или при одинаковой эффективности понизить вычислительную сложность. Предложенные алгоритмы работают на фоне фазового и аддитивного шумов с неизвестными законами распределения.

Все выше указанные результаты получены автором лично. Оригинальность и научная значимость полученных результатов подтверждается публикациями в российских и зарубежных рецензируемых изданиях. По теме диссертации опубликовано 49 работ: 26 публикаций в журналах, из них 18 из Перечня ВАК, 2 публикации входят в Web of Science; 18 докладов на конференциях, из них 5 публикаций в международной базе Scopus. Получено 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, что подтверждает практическую значимость исследования.

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

1. При решении задачи фазовой и тактовой синхронизации сигналов MSK нет сравнения по помехоустойчивости предложенных алгоритмов. Не показано, какой энергетический выигрыш даст повышение точности оценки частоты в 1.5-2 раза относительно метода Стратоновича.

2. Рассмотрен вариант реализации полученных процедур оценивания только на процессоре TMS320C645. Не показана возможность использовать более новые процессоры или ПЛИС.

3. Не совсем обоснован выбор модели фазовых шумов в виде авторегрессии и скользящего среднего. Нет пояснения, почему ограничились моделью второго порядка.

4. Не рассмотрена оценка и компенсация частотно зависимого амплитудно-фазового дисбаланса.

5. Алгоритм фильтрации с полосовой помехой проведен без компенсации помехи, причем последняя слабая.

6. Для систем с ММО при синтезе алгоритмов оценивания применялась только полиномиальная аппроксимация. Нет четкого обоснования того, почему остановились на этой аппроксимирующей конструкции.

7. Для систем с OFDM использовалась полиномиальная аппроксимация, коэффициенты которой зависят от частоты. Такой подход приводит к увеличению числа оцениваемых параметров, что усложняет алгоритм. Не проведено исследование того, что при этом приобретается, а что теряется.

### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.**

Диссертационная работа Поборчей Натальи Евгеньевны «Разработка эффективных методов и алгоритмов оценивания параметров канала связи в условиях априорной неопределенности» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, актуальную для радиотехнической отрасли, и отрасли связи.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации, раскрывает основные положения работы и полученные результаты. В заключении автореферата приведены основные выводы по диссертации.



Диссертация Поборчей Н.Е. соответствует паспорту специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (п.4).

Основные выводы по результатам исследований достоверны и обоснованы.

Положения, выносимые на защиту, достаточно полно опубликованы в рецензируемых изданиях и апробированы на научных конференциях.

Замечания по диссертации не снижают ценности научно-квалификационной работы.

Вывод: диссертационная работа Поборчей Н.Е. полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Официальный оппонент  
Начальник научно-технического управления  
АО «Концерн «Созвездие»,  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
394018, г. Воронеж, ул. Плехановская, д.14  
Тел.: +7-473-252-1253

Н.М. Тихомиров

«Личную подпись Н.М. Тихомирова удостоверяю»

И.О. Ученого Секретаря,  
доктор физико-математических наук



Д.В. Костин

«10» августа 2021г.