

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 219.001.04
НА БАЗЕ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ФЕДЕРАЛЬНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И ИНФОРМАТИКИ»,
МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК**

аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 23.09.2021 № 82

о присуждении Поборчей Наталье Евгеньевне, гражданке Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Разработка эффективных методов и алгоритмов оценивания параметров канала связи в условиях априорной неопределенности» по специальности 05.12.04 (2.2.13) – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения принята к защите 10.06.2021, протокол № 81, диссертационным советом Д 219.001.04 (55.2.002.01) на базе ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (далее МТУСИ), Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8а, Приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 244/нк от 03.03.2016, изменения в составе утверждены Приказами Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 37/нк от 30.01.2019, № 599/нк от 15.10.2020, №804/нк от 16.12.2020, № 331/нк от 12.04.2021.

Соискатель Поборчая Наталья Евгеньевна, 1971 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Применение теории нелинейной фильтрации и управления для синтеза систем фазовой синхронизации» защитила в 1997 году в диссертационном совете К 118.06.03 на базе МТУСИ, работает доцентом на кафедре общей теории связи МТУСИ.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук выполнена на кафедре общей теории связи МТУСИ.

Научный консультант – доктор технических наук, профессор Крейнделин Виталий Борисович, МТУСИ, кафедра теории электрических цепей, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Карташевский Вячеслав Григорьевич – доктор технических наук, профессор, ПГУТИ, кафедра информационной безопасности, заведующий кафедрой;

Бокк Герман Олегович – доктор технических наук, ООО «НСТТ», директор по науке;

Тихомиров Николай Михайлович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, АО «Концерн «Созвездие», начальник научно-технического управления
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - федеральное государственное унитарное предприятие «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева» (ФГУП НИИР), г. Москва

в своем положительном заключении, подписанном В.Э. Веерпалу – д.т.н., начальником центра ФГУП НИИР, И.В. Кокошкиным – к.т.н., доцентом, начальником центра ФГУП НИИР, утвержденном М.Ю. Сподобаевым – к.т.н., первым заместителем генерального директора ФГУП НИИР, **указала**, что не вызывает сомнения практическая ценность 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.

Соискатель имеет 49 опубликованных работ по теме диссертации, в том числе 30 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях: 18 статей в журналах из перечня ВАК, 2 публикации входят в Web of Science, 5 публикаций по материалам конференций, входящих в международную базу Scopus и 5 свидетельств о регистрации программ на ЭВМ. Общий объем опубликованных работ составляет 12.4 п.л. (авторский вклад 10.8 п.л. (87%)). Объем работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК, – 4.7. п.л.

Наиболее значительные работы:

1. **Smerdova, N.E. (Poborchaya N.E.)** Control of nonlinear dynamical systems with incomplete information. / N.E. Smerdova, A.M. Shloma // Journal of Communications Technology and Electronics. – 1999. – 44, № 9. – pp. 983–998. (личный вклад автора 58%);
2. **Smerdova, N.E. (Poborchaya N.E.)** Application of the theory of operators of functional analysis for problems of nonlinear filtering. / N.E. Smerdova, A.M. Shloma // Journal of Communications Technology and Electronics. – 1999. – 44, № 2. – pp. 178–186. (личный вклад автора 55%);

3. **Поборчая, Н.Е.** Синтез алгоритма оценки параметров случайного сигнала в условиях априорной неопределенности. / **Н.Е. Поборчая** // *Электросвязь*. -2008. - №6. - С. 29- 32;
4. **Поборчая, Н.Е.** Методы совместной оценки дрейфа постоянных составляющих и амплитудно-фазового разбаланса КАМ сигнала на фоне аддитивного белого шума. / **Н.Е. Поборчая** // *Электросвязь*. – 2013. – №5. – С.24–26;
5. **Поборчая, Н.Е.** Оценка и компенсация искажений сигнала в канале с доплеровским расширением спектра и релейскими замираниями. / **Н.Е. Поборчая, Е.Р. Хасьянова** // *Электросвязь*. - 2017. -№6, С. 44-49. (личный вклад автора 70%);
6. **Поборчая, Н.Е.** Синтез и анализ алгоритмов оценки искажений сигнала в системе с ММО в условиях априорной неопределенности. / **Н.Е. Поборчая, А.В. Пестряков** // *T-Comm*. - 2019. - T13.- №10.- С. 13-20. (личный вклад автора 87%);
7. **Поборчая, Н.Е.** Анализ влияния априорной неопределенности относительно дисперсии аддитивного шума на работу алгоритмов оценивания параметров сигнала. / **Н.Е. Поборчая** // *Электросвязь*. - 2021. - №2. – С. 39-42;
8. **Poborchaya, N.E.** DC-offset and IQ-imbalance estimation in the MIMO system. / **N.E. Poborchaya** // 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO), 3-4 July 2017, Kazan, Russia. DOI: 10.1109/SINKHROINFO.2017.7997548;
9. **Poborchaya, N.E.** Synthesis of the joint estimation algorithm of the OFDM signal distortions based on polynomial approximation. / **N.E. Poborchaya** // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 4-5 July 2018, Minsk, Belarus. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456930;
10. **Poborchaya, N.E.** Nonlinear Filtration in the Problem of Joint Estimation of Channel Factors and OFDM Signal Distortion Arising in Direct Conversion Receiver. / **N.E. Poborchaya** // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 1-3 July 2019, Yaroslavl, Russia. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8814291;
11. **Poborchaya, N.E.** Stationary channel factors and signal disturbances in a direct converter receiver in a system with MIMO joint estimation algorithm. / **N.E. Poborchaya** // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 1-3 July 2020, Svetlogorsk, Russia. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166068;

12. Maksimov, S. Yu. Estimation of a channel factors and signal distortions in the MIMO system with a direct transform receiver under the conditions of rayleigh fading and doppler frequency dispersion. / S. Yu Maksimov, N.E. Poborchaya // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 1-3 July 2020, Svetlogorsk, Russia. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166116. (личный вклад автора 75%).

Недостовверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, отсутствуют.

На диссертацию и автореферат поступило 8 положительных отзывов: Севастопольский национальный технического университет, ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт связи», АНО «Научно-технический центр информатики» (НТЦИ), ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Научно-технический центр КОМСЕТ (ООО «НТЦ КОМСЕТ»), Научно-технический центр СОТСБИ (ООО «НТЦ СОТСБИ»), ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова», ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт».

Были отмечены следующие недостатки:

1. формулировка научной проблемы подменена методом ее решения;
2. не ясно, при каких начальных условиях работали предложенные рекуррентные алгоритмы и как они влияют на сходимость последних;
3. не понятно, как формировались множители канала для систем связи с MIMO на стр. 20, а также учитывались ли при этом анализе замирания;
4. не отмечена возможность использования полученных результатов в сетях связи 5G, 6G, 7G;
5. на стр.19 упоминается комбинированная процедура (3), (5), но нет ее описания;
6. на стр.21, 24 автореферата взятие функции арктангенса может привести к увеличению ошибок оценивания фазового дисбаланса и сдвига частоты;
7. не показано от чего зависит выбор порядка полиномиальной аппроксимации p на стр. 18, 21, 24;
8. нет пояснения, что такое двукратная обработка выборки;
9. не отмечено при каком уровне фазового шума проведен вычислительный эксперимент;
10. мало моделей негауссовского шума использовалось в эксперименте;

11. не предложена схемотехническая база, на которой можно реализовать синтезированные алгоритмы;
12. не понятно, как выбирался параметр регуляризации для алгоритма нелинейной фильтрации;
13. для алгоритма оценивания неизвестных параметров канала для систем с OFDM нет анализа вычислительной сложности, зависящей от порядка аппроксимации;
14. в пояснениях к рисункам не указаны все данные, при которых проводился анализ работоспособности полученных алгоритмов;
15. не все обозначения расшифрованы;
16. второе приближение по Тейлору использовалось только при синтезе алгоритмов нелинейной фильтрации. Нет обоснования, почему оно не применялось в регуляризирующих алгоритмах;
17. нет исследования применения синтезированных алгоритмов в системе с Massive MIMO;
18. нет пояснения какие замирания моделировались при проведении исследования;
19. в автореферате говорится о сокращении длительности тестового сигнала, но при этом нет данных о минимально возможном значении этого параметра, при котором предложенные алгоритмы сохраняют свою работоспособность;
20. для систем с MIMO и OFDM в модель сигнала не включена межсимвольная интерференция;
21. судя по автореферату синтезирован ряд алгоритмов для повышения помехоустойчивости ЦСС в канале с прямым преобразованием частоты. При этом можно подчеркнуть различие подходов синтеза, соответственно отсутствие единой системной идеи, на которой бы строилась работа;
22. синтез алгоритмов повышения помехоустойчивости предполагает ограничения, связанные с вычислительными возможностями элементной базы; с научной точки зрения это не совсем корректно, с учетом технологической революции сегодня одни возможности, завтра на порядок выше;
23. в третьей главе разрабатываются новые алгоритмы фазовой и тактовой синхронизации на фоне аддитивного шума с неизвестным законом распределения; все связанное с синхронизацией давно стало классикой, почему бы не сравнить с известными результатами, опубликованными ранее (например, в работах П.Н. Сердюкова);
24. имеются претензии к качеству рисунков;

25. не совсем понятно, синтез алгоритмов оценивания проводился в условиях МСИ или нет;

26. для систем с OFDM представлено исследование разработанных алгоритмов только в условиях медленно меняющегося канала; возможно ли адаптировать предложенные процедуры для других моделей канала связи?

Недостатки, отмеченные оппонентами и ведущей организацией.

1. На протяжении всего текста диссертации встречается фраза: «оценивание производится как по тестовой, так и по информационной последовательности после детектирования». К примеру, как понимать фразу на стр. 215: количество детектируемых символов в сигнале в 4 раза больше символов тестовой комбинации?

2. Представляется избыточным материал с подробным анализом «чужих» алгоритмов фильтрации (стр. 34 и далее), показывающий их слабые качественные показатели. Может быть было бы целесообразнее сначала компенсировать искажения аппаратного происхождения, а потом оценивать (и компенсировать) искажения, связанные с влиянием канала связи. Параметры точности и вычислительной сложности от этого бы только «выиграли».

3. На стр. 40 обсуждается пример, в котором для оценивания аппаратных погрешностей при использовании сигналов OFDM используются априорные сведения о расположении символов OFDM на временной оси. Откуда берутся эти сведения?

4. Ни в модели системы, ни в модели наблюдений нет параметров, описывающих характер замираний. При этом рис. 1.12, 1.13 дают графики вероятности ошибки в зависимости от отношения сигнал/шум при разных параметрах используемого для передачи сигнала QAM. Данная ситуация требует комментария автора работы с обязательным объяснением того, как вычислялась вероятность ошибки в эксперименте с процедурой линейной фильтрации.

5. На стр. 150 и 151 задаются взаимоисключающие начальные условия для алгоритма. А именно: на стр. 150 говорится, что импульсная характеристика канала соответствует коэффициенту передачи канала в виде «приподнятого косинуса», а неизвестным параметром является только амплитуда сигнала и соответственно отсчёты «хвостов» импульсной характеристики; на стр. 151 утверждается, что задача решается при неизвестной импульсной характеристике и соответственно значения отсчетов «хвостов» не могут быть определены. Считаю необходимым комментарий автора по данному замечанию.

6. Попытка использовать алгоритмы фильтрации при обработке сигналов в месте приема приводит к замене задачи различения гипотез задачей оценивания,

которые решаются согласно разным критериям оптимальности. Так, например, результаты, представленные на рис.4.13, 4.14, 4.15, 4.16 и др., где представлены зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум, полученные для системы 64-QAM методом коррекции на основе уравнений фильтрации хорошо бы сравнить с аналогичными результатами, полученными из решения задачи оптимального приема дискретных сообщений по критерию минимума средней вероятности ошибки. В связи с этим спорным является замечание автора (стр. 173) о том, что межсимвольную интерференцию можно убрать, если «сократить скорость передачи символов ниже скорости Найквиста для практической реализации фильтров на передающей и приёмной стороне». Рассеяние, которое обусловлено свойствами канала компенсировать полностью корректорами искажений не целесообразно и, к тому же, не всегда возможно. Поэтому основная стратегия борьбы с межсимвольной интерференцией заключается в следующем: сначала частично компенсировать рассеяние корректором, а затем для формирования решений о переданных символах применять методы оптимального приема дискретных сообщений.

7. 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.

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

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

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

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

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

13. 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.

14. При оценках вычислительных затрат лучше было ориентироваться на современные методы параллельного программирования, например, на базе графических процессоров GPU, а не на монопольный режим CPU разработок 2000 года.

15. Стр. 343, вывод №7. Утверждение о том, что сдвиг частоты, приводящий к $\Delta f T \sim 2 \cdot 10^{-3}$ является большим представляется спорным, т.к. он будет на одном символе OFDM приводить к фазовому набегу $\pm 0.4^\circ$, что ничтожно мало с точки зрения корреляционного приема даже для таких видов модуляции, как QAM256

16. Стр. 350, вывод №8. Техника сплайнов, заявленная в разделе, рассмотрена без решения вопросов сопряжения на границах. Поэтому это скорее не сплайны, простейшие вейвлеты с прямоугольной огибающей.

17. В диссертации автор использует теорию и технику нелинейной фильтрации для задачи стохастической аппроксимации и формирования экстремального решения при оценке неизвестных параметров (см. стр. 53, 69, 131, 154, ..., приложение 1). Главное положительное качество алгоритмов фильтрации – максимально быстро сходиться при корректном выборе режима управления параметром усиления в петле обратной связи. Вместо этого в работе предлагается использовать чрезвычайно малые постоянные значения дисперсии возмущающего воздействия. Это приводит к увеличению длительности переходных процессов для алгоритмов настройки и малым областям захвата.

18. Для оценки параметров канала с доплеровским расширением спектра и релейскими замираниями исследован алгоритм с полиномиальной аппроксимацией только первого и второго порядка. Нет анализа использования порядка аппроксимирующей модели от скорости изменения канала.

19. Для систем связи с MIMO не рассмотрен анализ работы предложенных алгоритмов оценивания при количестве передающих и приемных антенн больше 8.

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

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты и представители ведущей организации имеют значительное количество публикаций, близких к теме диссертационного исследования.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан новый комплекс высокоточных методов совместной оценки параметров канала связи в условиях априорной неопределенности относительно динамической системы и распределения шумов, позволяющий с единых позиций решать, как

линейные, так и нелинейные задачи с разными аппроксимирующими конструкциями, позволяющий повысить точность оценивания при меньших выборках сигнала;

предложены новые алгоритмы оценки параметров канала связи для систем с SISO, MIMO, OFDM в задачах фазовой синхронизации и компенсации искажений сигнала, вносимых приемником прямого преобразования, обладающие более низкой вычислительной сложностью по сравнению с известными совместными процедурами оценивания;

доказано повышение помехоустойчивости приема информации при удовлетворительной вычислительной сложности процедур обработки сигналов при использовании предложенных алгоритмов оценивания.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны утверждения об асимптотической несмещенности и эффективности полученных оценок, что позволяет использовать предложенные алгоритмы в условиях априорной неопределенности относительно законов распределения процессов, входящих в модель наблюдений;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы метод нелинейной рекуррентной фильтрации, теория регуляризации А.Н. Тихонова и метод наименьших квадратов;

изложены этапы синтеза алгоритмов совместного оценивания параметров канала связи и искажений сигнала в приемнике прямого преобразования, осуществляющих оценивание как по тестовой последовательности, так и по информационным символам после процедуры детектирования;

раскрыта проблема, состоящая в ужесточении требований к скорости и точности оценки параметров канала связи с увеличением скорости передачи информации;

изучены противоречия между скоростью передачи информации и вычислительной сложностью алгоритмов оценивания параметров канала связи в условиях априорной неопределенности;

проведена модернизация существующих математических моделей канала связи, которая учитывает кроме параметров канала, как непосредственно среды распространения, еще и искажения сигнала в приемнике прямого преобразования: сдвиг частоты, амплитудный и фазовый дисбаланс между квадратурами сигнала, а также дрейф постоянных составляющих.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены метод совместного оценивания и компенсации искажений сигнала, вносимых каналом связи и приемником прямого преобразования, алгоритмы совместного оценивания параметров канала связи и искажений многопозиционного сигнала в тракте приемника прямого преобразования для систем с SISO, MIMO, OFDM, которые используются при проведении научно-исследовательских работ ФГУП НИИР, в научно-производственной деятельности АО «Научно-исследовательский институт микроприборов-К», в программном коде прошивок узла калибровки базовых станций системы подвижной радиосвязи технологии МАКВИЛ и в модуле эквалайзера абонентских терминалов в ООО «НСТТ», а также в учебном процессе кафедры «Общая теория связи» МГУСИ;

определены значения энергетического выигрыша до 4 дБ при использовании предложенных новых алгоритмов оценивания относительно известных процедур;

создана система практических рекомендаций применения предложенных алгоритмов оценивания параметров канала связи;

представлены предложения по дальнейшему совершенствованию алгоритмов совместного оценивания параметров канала связи.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты получены с помощью вычислительного эксперимента в лицензионной среде инженерных и научных расчетов MATLAB, показана воспроизводимость результатов исследования на примерах известных алгоритмов оценивания параметров канала связи;

теория построена на известных методах статистической радиотехники, оптимальной рекуррентной фильтрации и методах регуляризации;

идея базируется на анализе ранее полученных результатов по теме диссертационного исследования;

использованы сравнения полученных данных с помощью предложенных алгоритмов с известными ранее процедурами оценивания;

установлено, что результаты исследования не противоречат выводам отечественных и зарубежных ученых, опубликованным в ведущих научно-технических журналах, количественное совпадение авторских результатов моделирования с результатами моделирования, представленными в независимых источниках;

использованы известные методы статистического моделирования в вычислительном эксперименте при получении количественных оценок работы предложенных алгоритмов.

Личный вклад соискателя состоит в том, что все результаты, представленные в диссертации, получены самостоятельно.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания: 1) для демодуляции целесообразно использовать демодулятор максимального правдоподобия, реализованный в виде сферического декодера, а не декоррелятор, который применялся в работе; 2) в диссертации использовано понятие эффективности алгоритмов, но не раскрыто содержание этого термина; 3) не представлены результаты исследования предложенных алгоритмов для систем связи с OFDM, работающих в условиях города.

Соискатель Поборчая Н.Е. ответила на задаваемые ей вопросы и согласилась с высказанными критическими замечаниями.

На заседании 23.09.2021 диссертационный совет принял решение: за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, обеспечивающее повышение точности оценивания параметров канала связи, что может быть использовано для повышения помехоустойчивости приема информации, **присудить** Поборчей Н.Е. **ученую степень доктора технических наук.**

При проведении **тайного голосования** диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, **проголосовали:** за 17, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель

диссертационного совета



Аджемов Артем Сергеевич

Ученый секретарь

диссертационного совета

Терешонок Максим Валерьевич

Дата оформления Заключения 24.09.2021