

и ММО. Решение единым подходом задачи оценивания случайных возмущений, вызванных аппаратной частью приемника и канала связи (у которых разная физическая природа) при использовании разных технологий передачи показало, что оценки параметров (и вычислительная сложность их получения), определяющих свойства системы синхронизации, существенно зависят от типа технологии передачи.

Полученные результаты при использовании такого подхода подтвердили **актуальность задачи**, решаемой в диссертации.

Научная новизна.

В результате диссертационного исследования получены следующие новые результаты:

1. в условиях априорной неопределенности относительно распределения шумов предложен новый регуляризирующий метод совместной оценки параметров канала связи, который позволяет решать, линейные и нелинейные задачи с разными аппроксимирующими конструкциями;
2. предложена новая процедура рекуррентного нахождения параметра регуляризации, которая при ограниченных выборках сигнала позволяет увеличить точность оценивания неизвестных параметров канала связи;
3. в условиях априорной неопределенности относительно статистических характеристик канала связи с доплеровским расширением спектра и релеевскими замираниями предложен новый метод совместной оценки параметров канала связи и искажений сигнала в тракте приемника прямого преобразования, использующий полиномиальную аппроксимацию, работающий как по тестовой, так и по информационной последовательности после детектирования, который обладает вычислительной сложностью, линейно зависящей от объема выборки сигнала;
4. на основе метода, предложенного в п 1, для систем с SISO предложены новые рекуррентные алгоритмы совместной оценки параметров канала связи для задач фазовой и тактовой синхронизации и компенсации искажений, вносимых приемником прямого преобразования, позволяющие сократить длину тестовой последовательности, а также повысить точность оценивания;
5. на основе методов, предложенных в п. 1 и 3, для систем с ММО предложены новые алгоритмы совместной оценки матрицы канала связи и искажений сигнала в приемнике прямого преобразования, позволяющие понизить сложность по сравнению с известными методами совместного оценивания;

б. на основе предложенных методов в п. 1 и 3 для системы с OFDM предложены во временной области новые алгоритмы совместной оценки параметров канала связи и искажений сигнала в приемнике прямого преобразования, которые позволяют повысить точность оценивания или понизить вычислительную сложность относительно известных процедур.

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

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы достаточно широким обзором и анализом методов, которые используются для оценивания параметров канала связи и искажений сигнала в приемнике прямого преобразования, а также проведенными исследованиями, основанными на методах математической статистики, нелинейной рекуррентной фильтрации, методе наименьших квадратов, теории регуляризации для решения некорректно поставленных задач. Результаты теоретических исследований подтверждены результатами статистического имитационного моделирования.

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.

В условиях априорной неопределенности относительно статистических характеристик канала связи и законов распределения шумов синтезированы методы совместного оценивания параметров канала и на их основе разработаны алгоритмы оценивания, работающие, как по тестовой, так и по информационной последовательности.

Практическая значимость диссертационной работы.

На фоне фазового и аддитивного шумов с неизвестными законами распределения показана возможность повышения точности оценивания неизвестных параметров канала и искажений сигнала в приемнике прямого преобразования, что позволяет получить энергетический выигрыш до 4 дБ

перед известными методами оценивания для систем одиночного приема с модуляцией M-QAM и технологиями OFDM и MIMO, или при одинаковой эффективности понизить вычислительную сложность.

Все выше перечисленные 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 учтены в системе цитирования Web of Science; 18 докладов на конференциях, из них 5 публикаций учтены в международной базе Scopus. Получено 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, что подтверждает практическую значимость исследования.

Замечания по диссертационной работе.

1. На протяжении всего текста диссертации встречается фраза: «оценивание производится как по тестовой, так и по информационной последовательности после детектирования». По мнению оппонента здесь присутствует и смысловая и фразеологическая неточность, которую необходимо устранить устным разъяснением на конкретном примере. 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. В качестве главной причины недостатков чужих алгоритмов предполагается *неиспользование* идеи «оценивания параметров после процедуры детектирования информационных символов». По логике изложения материала следовало бы сначала показать достоинства такого подхода, тогда объяснение причин недостатков выглядело бы убедительней. И вообще, может быть было бы целесообразнее разбить процедуру оценивания на две фазы: 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. Алгоритмы, рассмотренные в диссертации, в первую очередь (по мнению оппонента) целесообразно использовать для решения задач синхронизации. Однако, на стр. 40 обсуждается пример, в котором для оценивания аппаратурных погрешностей при использовании сигналов OFDM

используются априорные сведения о расположении символов OFDM на временной оси. Откуда берутся эти сведения ?

4. Уравнения (1.33) дают решение задачи по формированию оценки состояния динамической системы по критерию минимума СКО. Предполагается, что динамическая система при этом представляет собой доплеровский канал (по модели Джейкса) с рэлеевскими замираниями. Однако, 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. В разделе 4.1.1 решается задача оценивания дрейфа постоянной составляющей и амплитудно-фазового разбаланса при обработке сигнала QAM на выходе канала с рассеянием. 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.

Далее в разделе приведён обширный набор результатов по оцениванию фазы и частоты сигнала и значений отсчетов «хвостов» импульсной характеристики, а также оценивается вероятность ошибки при приеме сигналов 64-QAM. Приведенная на стр.156 структурная схема компенсации искажений не проясняет ситуацию. Считаю необходимым комментарий автора по данному замечанию.

6. Хорошо известно, что временное рассеяние энергии передаваемого сигнала (память канала) порождает явление межсимвольной интерференции при передаче дискретных сообщений и приводит к существенной потере помехоустойчивости любой системы.

По сути дела, использование технологий QAM, OFDM и MIMO предназначено для передачи дискретных сообщений в каналах связи, и 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».

Теоретические результаты и опыт эксплуатации систем с межсимвольной интерференцией показывает, что рассеяние, которое обусловлено свойствами канала (особенно радиоканала) 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.

Общее заключение по диссертации

Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации Поборчей Н.Е. Она представляет собой законченную научно-квалификационную работу **прорывного характера**, в которой на высоком теоретическом уровне решена актуальная проблема разработки и исследования методов и алгоритмов оценивания параметров сигналов на выходе канала связи в условиях априорной неопределенности, что вносит существенный вклад в развитие радиотехнической науки в стране. Изложенные в диссертации научные результаты, полученные Поборчей Н.Е., получили высокую оценку специалистов и в России, и за рубежом, вследствие чего автор завоевал заслуженный авторитет.

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.

Вывод.

Диссертационная работа отвечает требованиям ВАК Минобрнауки РФ, соответствует критериям, изложенным в разделе II действующего «Положения о присуждении ученых степеней» (в ред. от 01.10.2018, с изм. от 26.05.2020), а её автор, Поборчая Наталья Евгеньевна, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Официальный оппонент, заведующий кафедрой Информационной безопасности ПГУТИ Карташевский В.Г.

25 августа 2021г.

Сведения об оппоненте:

Карташевский Вячеслав Григорьевич, гражданин Российской Федерации, Заслуженный работник связи РФ, доктор технических наук по специальности 05.12.02 – «Системы и устройства передачи информации по каналам связи» (1995г.), профессор по кафедре «Автоматической электросвязи» (1997г.), заведующий кафедрой Информационной безопасности Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ).

Адрес: ул. Льва Толстого, д. 23, Самара, 443010.

Телефон: (927) 794-12-48, E-mail: kartashevskiy-vg@psuti.ru

д.т.н., профессор

В.Г. Карташевский

Подпись Карташевского В.Г. заверяю

Проректор ПГУТИ по НИ

д.ф.-м.н., доцент

О.В. Осипов

