

# Введение

Тенденция развития современных средств связи направлена на увеличение объемов передаваемой информации. Это реализуется, например, путем использования высокопозиционных видов модуляции, таких как квадратурная амплитудная модуляция (QAM) 64-QAM, 256-QAM, 1024-QAM, технологии многоантенных систем (MIMO) и частично технологии ортогонального мультиплексирования с частотным уплотнением (OFDM). При этом важную роль играет качество приема сигналов. Поэтому MIMO является одной из самых перспективных систем, она позволяет повысить скорость передачи информации или (и) помехоустойчивость.

Задача повышения помехоустойчивости систем связи является актуальной и складывается из нескольких этапов: помехоустойчивое кодирование, разносенный прием, использование каналов обратной связи, применение процедуры расширения спектра, квазикогерентный прием, который можно осуществить, реализовав качественную синхронизацию и компенсацию искажений сигнала [1–29]. Именно этому последнему пункту посвящена данная работа. В основе решения задачи лежит оценка канала связи и параметров принимаемого процесса.

Наиболее простой и дешевой схемой приема является процедура прямого преобразования, которая состоит в переносе высокочастотного принимаемого сигнала на нулевую частоту с образованием двух квадратур. Но данный метод имеет крупный недостаток, который состоит в наличии амплитудно-фазового дисбаланса между квадратурами сигнала, смещения частоты из-за несовпадения частот принимаемого сигнала и гетеродина приемника, а также дрейфа постоянных составляющих [30–40]. Последний появляется в результате просачивания сигнала гетеродина на вход устройства [38, 39]. Энергия постоянной составляющей может быть больше энергии полезного сигнала. В этом случае она, попадая в последующие каскады приемного устройства, делает процедуру детектирования с заданной вероятностью ошибки невозможной. Отмеченные искажения, так же как и канал, очень сильно влияют на помехоустойчивость. С переходом работы систем связи на все более высокие частоты (стандарт 5G и разрабатываемый 6G) эти недо-

статки только усугубляются [20, 39]. Поэтому актуальна задача создания методов и алгоритмов оценки описанных искажений и параметров канала связи. Чем точнее будет произведена их оценка, тем меньше вероятность ошибки приема информационного символа. Это позволит, например, использовать помехоустойчивые коды с меньшей избыточностью или уменьшить скорость передачи данных по обратному каналу [8, 9, 12, 14–17, 20].

Повышению помехоустойчивости за счет более точного оценивания неизвестных параметров посвящено много работ, как зарубежных, так и отечественных авторов [19, 41–136]. Если используются оптимальные методы, то наиболее распространена байесовская оценка, основанная на минимизации среднего риска, и оценка максимального правдоподобия. В обоих случаях необходима априорная информация о законах распределения шумов. Если же параметры являются случайными процессами, то используется теория оптимальной фильтрации Колмогорова–Винера, Калмана для линейного случая и Стратоновича для нелинейного [43–46, 47, 48]. Также весомый вклад в развитие теории оптимального оценивания и фильтрации внесли такие ученые, как Р.С. Бьюси, К. Браммер, Г. Зиффлинг, Э. Сейдж, Дж. Мелс, Ю.Г. Сосулин, М.С. Ярлыков, В.И. Тихонов, Б.И. Шахтарин, А.М. Шлома, В.П. Волчков, В.В. Крейнделин, М.Г. Бакулин, В.Г. Карташевский, А.П. Трифонов, Ю.С. Шинаков, С.С. Аджемов, Л.Н. Казаков и др. [49–89, 239–247]. Как правило, все алгоритмы синтезированы в условиях гауссовских законов распределения случайных процессов, что часто соответствует реальной ситуации, когда выполняется центральная предельная теорема (ЦПТ) теории вероятностей. Например, реальный шум — это сложение мешающих воздействий от большого количества источников, или когда присутствует эффект нормализации, при котором процесс проходит узкополосную линейную систему и на ее выходе становится гауссовским. Однако не всегда помехи и шумы можно аппроксимировать нормальным законом распределения. ЦПТ не выполняется, например, если в приемнике нет узкополосного фильтра. Эта ситуация может быть при расширении полосы частот сигнала для увеличения пропускной способности системы связи. Фазовый шум гетеродина, узкополосные и импульсные помехи также являются негауссовскими случайными процессами. В таких случаях может использоваться адаптивная фильтрация [90–93]. Методам оценивания при негауссовских шумах посвящены работы [103–136].

Обзор методов оценивания канала и искажений сигнала в приемнике прямого преобразования приведен в [19, 41, 42]. Как правило, рассматривается оценка только параметров канала без учета искажений, вносимых приемником прямого преобразования, или предложены алгоритмы оценивания канала и искажений сигнала по отдельности. Вклад в решение этой проблемы внесли такие ученые, как Т. Yoshida, S.A. Chakra, J. Tubbaх,

M. Valkama, Xiong Youzhi, Aziz Mohsin, Wence Zhang, Khandker Nadya Haq, M. Mailand, N. Kolomvakis, K. Puntsri, W. Gappmair, Chen-Jiu Hsu, А.В. Пестряков, Е.Р. Хасьянова и др. [137–169, 222–225].

Для минимизации временных и вычислительных затрат можно не проводить идентификацию шумов, а использовать метод наименьших квадратов (МНК) [101, 102] или процедуру стохастической аппроксимации, которые позволяют работать в условиях данной априорной неопределенности. Метод наименьших квадратов был введен еще в работах К. Гаусса (1794–1795) и А. Лежандра (1805–1806). С развитием этого метода связаны такие известные математики, как О. Коши, П.Л. Чебышев, К. Пирсон, А.А. Марков, А.Н. Колмогоров, Р. Фишер, С. Рао, А. Херл и др. Очень подробно данный подход разработан и использован при решении технических задач для линейных моделей. Алгоритм стохастической аппроксимации создан для параметрических и непараметрических задач оценивания и представляет собой рекуррентную процедуру, которая осуществляет уточнение оценки при каждом следующем наблюдении. Первым таким алгоритмом была процедура Роббинса–Монро [94]. В дальнейшей разработке метода стохастической аппроксимации приняли участие М. Вазан, М.Б. Невельсон, Р.З. Хасьминский, В.Т. Поляк, В.И. Джиган и др. [95–97].

В технике связи встречаются некорректно поставленные задачи (по Адамару), которые требуют специального подхода. Эта ситуация возникает, например, тогда, когда оператор (линейный или нелинейный), описывающий наблюдаемый процесс, не имеет обратного оператора, или процесс определяется с ошибками, приводящими к расходимости используемого вычислительного алгоритма. Решение таких задач производится путем введения регуляризующего параметра в процедуру оценивания. Метод регуляризации для решения некорректных операторных уравнений развил А.Н. Тихонов (1963 г.). Также большой вклад в теорию некорректно поставленных задач внесли А.С. Леонов, А.Г. Ягола, А.Б. Бакушинский, А.В. Гончарский, В.А. Морозов и др. [98–100].

Тем не менее при большом количестве работ в математических изданиях в задачах оценивания канала и параметров случайного сигнала регуляризующие методы освещены слабо. Не изучены их возможности для применения в этой области. С интенсивным развитием вычислительной и микропроцессорной техники становится возможным реализовать более сложные алгоритмы совместной оценки параметров случайного сигнала и канала, которые обладают более высокой точностью, чем упрощенные процедуры, производящие оценку параметров, как правило, по отдельности и основанные на статистическом усреднении и классическом методе стохастической аппроксимации.

Целью исследования, представленного в монографии, является повышение помехоустойчивости систем связи за счет более точного совместного оценивания неизвестных параметров канала связи при приемлемой вычислительной сложности.

Областью применения новых алгоритмов оценивания являются системы тактовой и фазовой синхронизации сигналов, а также системы компенсации искажений, появляющихся в тракте приемника прямого преобразования в канале с релейскими замираниями и без них в системах с одной передающей и приемной антенной (SISO), с несколькими передающими и приемными антеннами (MIMO) и в системе со многими несущими с ортогональным частотным разделением (OFDM).

В первой главе приведен обзор методов и алгоритмов оценивания неизвестных параметров сигнала и канала связи.

Традиционно используемые алгоритмы требуют либо знания законов распределения шумов и статистики канала, либо обладают высокой вычислительной сложностью, либо используют большой объем выборки сигнала.

Также рассмотрены известные методы оценивания искажений, приобретенных сигналом в тракте приемника прямого преобразования для систем SISO и MIMO. В основном предлагаются процедуры отдельной оценки параметров сигнала и канала. Кроме этого считается, что часть параметров известна или найдена заранее с высокой точностью какими-нибудь другими методами. При относительно небольшом объеме выборки сигнала отдельная оценка уступает по точности совместной оценке параметров. Известные же совместные оценки неизвестных параметров сигнала и канала обладают или очень высокой вычислительной сложностью: минимальное количество операций пропорционально третьей степени от объема выборки сигнала, или нет замкнутых выражений для их получения.

Если рассматриваются алгоритмы, работающие по тестовым последовательностям, то подбирается их специальный вид, ориентированный на ту или иную процедуру оценивания. Поэтому синтезированные в таких условиях алгоритмы не применимы для оценки параметров по полученным после детектирования информационным символам. Слепые же алгоритмы оценивания работают по большому объему выборки.

Оценка нестационарного канала с релейскими замираниями и доплеровским расширением спектра получена методом линейной фильтрации с тригонометрической аппроксимацией множителей канала. Но этот известный подход не учитывает искажения сигнала, появляющиеся в тракте приемника прямого преобразования и требует знания частот квазигармоник, входящих в аппроксимирующую конструкцию. Кроме этого, увеличение количества последних приводит к существенному усложнению алгоритма оценивания.

Во второй главе на основе факторизации нелинейного оператора, модифицированного функционала А.Н. Тихонова и теории регуляризации разработан новый рекуррентный метод решения некорректно поставленных задач для совместного оценивания параметров канала связи и случайного сигнала, не требующий априорной информации о законах распределения случайных процессов [1–5, 19, 20, 26].

В третьей главе 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 релейевскими замираниями для систем SISO [7–12, 33–39, 45].

В четвертой главе проведено исследование влияния априорной неопределенности относительно помех и шумов на работу алгоритмов, разработанных в главе 3, основанных на методе, предложенном в главе 2 [5, 11, 12, 18, 37, 38].

В пятой главе проводится 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, описанного в главе 3 [13–15, 21, 24, 25, 40, 43, 44, 46, 48].

В шестой главе проведены синтез и анализ новых алгоритмов совместного оценивания канала и искажений сигнала в приемнике прямого преобразования в системе с OFDM [16, 17, 22, 23, 41, 42, 47].