

Королёв Алексей Викторович

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИГНАЛОВ,  
ОСНОВАННЫЕ НА СКРЫТЫХ МАРКОВСКИХ МОДЕЛЯХ

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Электроника и сети ЭВМ»  
Нижегородского государственного технического университета  
им. Р.Е. Алексеева»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Семашко Алексей Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Плужников Анатолий Дмитриевич

кандидат физико-математических наук,  
Шапошников Дмитрий Евгеньевич

Ведущая организация: ФГУП «НПП Полет»

Защита состоится 12 марта 2009 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.165.01 при Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

Автореферат разослан «\_\_\_» февраля 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Назаров А.В.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Актуальность темы: Работа посвящена исследованию и разработке методов анализа и обработки нестационарных случайных сигналов на основе применения скрытых марковских моделей со случайными скачкообразными изменениями параметров.

Скрытые марковские модели являются методологической основой для исследования многих современных радиотехнических систем: они активно используются для фильтрации сигналов, для нахождения оценок состояний радиотехнических систем, а также применяются в разных задачах структурного анализа. Скрытые марковские процессы нашли широкое применение в сфере телекоммуникаций, они используются для оценивания параметров сигналов при неизвестных характеристиках каналов связи.

При решении задач обработки скрытых марковских моделей обычно предполагается, что статистические характеристики информационных сигналов и структура наблюдений известны и постоянны во времени или же изменяются во времени, однако закон этого изменения заранее известен. Вместе с тем в большинстве практических задач различные измерительные радиотехнические системы работают в условиях нестационарной обстановки со скачкообразными изменениями параметров или импульсными возмущениями, возникающими в случайные заранее неизвестные моменты времени. Учет скачкообразных изменений параметров или импульсных возмущений сигналов необходим в системах связи при резком изменении уровня помех или случайных замираниях сигнала, в системах распознавания изменяющихся образов, в следящих системах сопровождения при маневрах цели. Таким образом, можно сделать вывод об актуальности, рассматриваемых в диссертации методов обработки и анализа структуры случайных нестационарных сигналов со скачкообразно изменяющимися параметрами в дискретном времени.

Цель работы: Разработать и исследовать алгоритмы обработки сигналов для скрытых марковские моделей со случайным скачком

параметров, которые бы позволяли, выбирая априорную статистику момента появления скачка, находить момент скачкообразного изменения параметров сигналов, оценивать последовательность скрытых состояний и вычислять параметры как для модели с дискретными наблюдениями, так и для модели с непрерывными наблюдениями на фоне аддитивных шумов.

Задачи работы:

1. Получить уравнения алгоритма декодирования сигналов для скрытых марковских моделей, обобщающих алгоритм Витерби на случай скачкообразного изменения параметров в случайный момент времени для модели с дискретнозначными наблюдениями. С целью проверки работоспособности провести моделирование синтезированного алгоритма.
2. Получить уравнения обобщенного алгоритма Витерби для скрытых марковских моделей со случайным скачком параметров, который позволяет оценивать последовательность состояний по данным непрерывных наблюдений принимаемых на фоне аддитивных гауссовых шумов. Провести моделирование синтезированного алгоритма.
3. Разработать алгоритм интерполяции сигналов и оценивания момента появления скачка параметров для скрытых марковских моделей, со скачкообразным изменением параметра в случайный момент времени.
4. Получить уравнения для оценки параметров скрытых марковских моделей, обобщающих алгоритм Баума-Уелша на случай скачкообразного изменения параметров модели в случайных момент времени с дискретнозначными наблюдениями. Получить уравнения для оценки апостериорной вероятности момента появления скачка. Исследовать зависимость точности оценивания параметров модели от числа их последовательных корректировок. Исследовать зависимость точности оценивания параметров от момента появления скачка

параметров. Исследовать работу алгоритма при условии малой вероятности скачка параметров.

5. Синтезировать алгоритм для оценки скачкообразно изменяющихся параметров скрытых марковских моделей для случая приема смеси наблюдаемой величины и аддитивного гауссовского шума. С целью проверки работоспособности провести моделирование алгоритма.

Методы решения. При решении поставленных задач использовались методы теории оптимальной обработки сигналов, методы марковской теории нелинейной фильтрации случайных процессов, методы обработки скрытых марковских процессов, а также общие методы теории вероятностей и теории статистической радиотехники.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Исследованы модели скрытых марковских процессов со скачкообразным изменением параметров модели в случайный момент времени и получены уравнения обобщенного алгоритма Витерби для оценивания последовательности скрытых состояний.

2. Для оценивания скрытых марковских процессов в обобщенной модели со скачкообразным изменением параметров был применен аппарат теории оптимальной нелинейной фильтрации сигналов, что позволило:

- Разработать алгоритмы оптимального оценивания последовательности скрытых состояний и момента появления скачка параметров путем интерполяции, т.е. анализа данных всей последовательности наблюдений;
- Разработать алгоритмы оценивания параметров обобщенной марковской цепи до момента и после момента их случайного скачкообразного изменения как для случая приема дискретнозначных наблюдений, так и для случая приема смеси наблюдаемой величины и аддитивного гауссова шума.

Практическая ценность. Полученные алгоритмы могут существенно улучшить качество и расширить область применения скрытых марковских

моделей в радиотехнических системах с существенно нестационарной обстановкой со случайными скачкообразными изменениями параметров, а именно:

1. В системах связи при резком изменении уровня помех или случайных замираниях сигнала.
2. При случайном возникновении помех в системах распознавания речи и образов.
3. При диагностике сложных технических систем, где часто необходимо оценивать переменные, характеризующие состояние системы, и своевременно обнаруживать скачки параметров, приводящие к нарушению нормального режима ее работы.

Разработана схема оценивания характеристик канала связи и приема данных на базе скрытых марковских моделей со случайным скачкообразным изменением параметров задачах оценивания характеристик канала связи без использования тренировочных последовательностей. Показано, что использование алгоритмов обработки скрытых марковских моделей со случайными скачкообразными изменениями параметров в системах связи без использования тренировочных последовательностей позволяет улучшить качество приема и при этом обеспечить устойчивость относительно временных изменений характеристик канала связи.

#### Положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм оценки состояний процесса позволяет по данным реализации наблюдений  $\{y_k, k = \overline{1, T}\}$  и при известных параметрах модели отыскать оценку удовлетворяющую критерию максимума апостериорной вероятности  $\hat{x}_0^T = \arg \max_{x_0^T} P(x_0^T | y_1^T)$  для сигналов, описываемых скрытой марковской моделью, со скачкообразным изменением параметров в случайный момент времени.

2. Алгоритм интерполяции позволяет по данным реализации наблюдений  $\{y_k, k = \overline{1, T}\}$  и при известных параметрах модели вычислять апостериорные вероятности  $P(x_k | y_1^T)$ ,  $P(k = \tau | y_1^T)$  состояний скачкообразно изменяющихся скрытых марковских моделей и момента их скачка.

3. Алгоритм оценки параметров позволяет по реализации наблюдений путем коррекции априорных значений параметров найти оценки условных вероятностей переходов и параметры распределения наблюдаемых величин, удовлетворяющих критерию локального максимума функции правдоподобия  $\max_{\{\pi_i^{0,1}\}, \{a_{ij}^{0,1}\}, \{b_j^{0,1}(Y)\}} P(y_1^T | \{\pi_i^{0,1}\}, \{a_{ij}^{0,1}\}, \{b_j^{0,1}(Y)\})$ , а также вычислить оценку момента дискретного времени  $\hat{\tau}$ , при котором происходит скачок параметров.

#### Публикация результатов

По теме диссертационной работы опубликованы семнадцать работ из них пять статей, тезисы одиннадцати докладов, в том числе пять статей в изданиях рекомендованных ВАК.

#### Апробация результатов

Основные результаты диссертации докладывались на VII Международной научно-технической конференции «Математические методы и информационные технологии в экономике», на седьмой нижегородской сессии молодых ученых, на 6-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA», на тринадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве», на научных конференциях по радиофизике, на научных семинарах Института радиотехники и информационных технологий НГТУ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и библиографического списка. Объем работы составляет 183 листа и содержит 37 рисунков. Список литературы включает 87 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обосновывается актуальность темы исследований, приведен краткий обзор работ по методам обработки скрытых марковских процессов и методам теории оптимального оценивания сигналов. Сформулированы цели работы, в аннотированном виде изложены основные результаты диссертационной работы.

В первой главе диссертации делается обзор существующих методов обработки скрытых марковских моделей и их использования в системах распознавания речи.

В п. 1.1 дается определение скрытых марковских моделей и их основных элементов и рассмотрен пример перехода от модели, описываемой марковской цепью, к скрытой марковской модели. Показана связь между состояниями наблюдениями и параметрами СММ (рисунок 1).

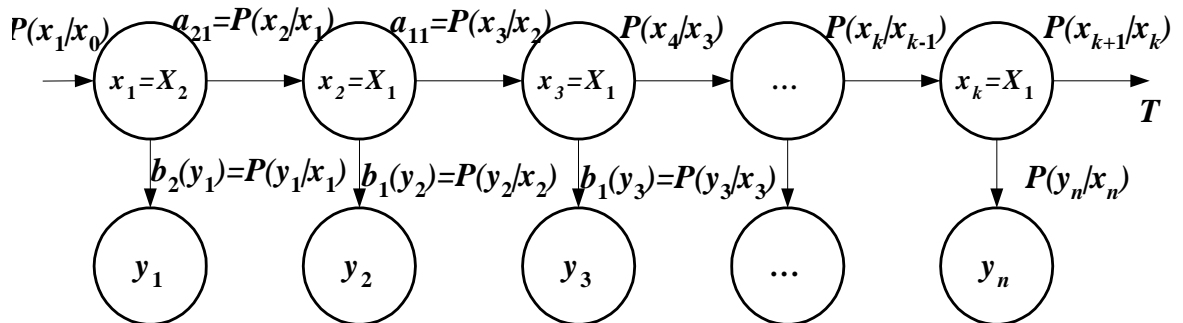


Рисунок 1. Графическое представление зависимостей между состояниями и наблюдениями в скрытой марковской модели.

Во втором параграфе рассмотрены основные задачи обработки СММ и приведены методы решения трех основных задач обработки скрытых марковских моделей.

В п. 1.3 рассмотрена возможность применения СММ на примере системы распознавания речевых команд. Рассмотрена общая схема распознавания речи с использованием СММ и основные принципы распознавания речи на базе скрытых марковских моделей и методы их использования при построении систем распознавания.



Показана общая схема распознавания речи и описаны элементы системы распознавания речи. Рассмотрены различные типы скрытых моделей используемых в практических задачах.

Во второй главе рассматриваются задачи оптимального оценивания последовательности состояний для моделей скрытых марковских процессов, обобщенных на случай скачкообразного изменения параметров в случайный момент времени.

В п. 2.1, п. 2.3 предполагается, что в дискретном времени последовательность наблюдений  $\{y_k, k = \overline{1, T}\}$  статистически связана с последовательностью скрытых состояний  $\{x_k, k = \overline{1, T}\}$  следующими условными вероятностями:

$$P(y_k = Y_m | x_k = X_j, k) = b_j(k, Y_m) =$$

$$= \begin{cases} b_j^0(k, Y_m) \equiv P^0(y_k = Y_m | x_k = X_j) & \text{при } 1 \leq k \leq \tau, \\ b_j^1(k, Y_m) \equiv P^1(y_k = Y_m | x_k = X_j) & \text{при } \tau < k \leq T, \end{cases} \quad (1)$$

$$(j = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}).$$

Здесь  $P^0(y_k = Y_m | x_k = X_j)$ ,  $P^1(y_k = Y_m | x_k = X_j)$  - известные условные вероятности наблюдений,  $Y_m$  - наблюдаемая дискретная величина из набора  $m = \overline{1, M}$  значений,  $X_j$  - скрытое состояние из набора  $j = \overline{1, N}$  значений,  $\tau$  - неизвестный момент времени, при котором происходит скачкообразное изменение параметров модели.

Марковская последовательность скрытых состояний описывается вероятностью переходов следующего вида:

$$P(x_k = X_j | x_{k-1} = X_i, k) = a_{ij}(k) =$$

$$= \begin{cases} a_{ij}^0(k) \equiv P^0(x_k = X_j | x_{k-1} = X_i, \tau) & \text{при } 1 \leq k \leq \tau, \\ a_{ij}^1(k) \equiv P^1(x_k = X_j | x_{k-1} = X_i) & \text{при } \tau < k \leq T, \end{cases} \quad (2)$$

$$(i, j = \overline{1, N});$$

и вероятностью начальных состояний:

$$P(x_0 = X_i) = \pi_i = \begin{cases} \pi_i^0 \equiv P^0(x_0 = X_i) & \text{при } \tau \geq 0, \\ \pi_i^1 \equiv P^1(x_0 = X_i) & \text{при } \tau < 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$(i = \overline{1, N}).$$

Здесь  $P^0(x_k = X_j | x_{k-1} = X_i)$ ,  $P^1(x_k = X_j | x_{k-1} = X_i)$ ,  $P^0(x_0 = X_i)$ ,  $P^1(x_0 = X_i)$  - априорно известные вероятности в рассматриваемой модели.

Графически описанную модель при  $k = \tau$  можно представить в виде, показанном на рисунке 2.

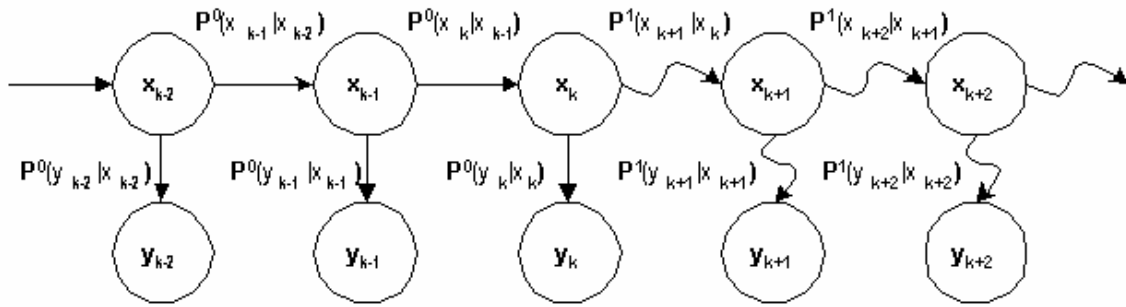


Рисунок 2. Графическое представление зависимостей между состояниями и наблюдениями в скрытой марковской модели со скачком параметров.

В п. 2.1 выводятся уравнения обобщенного алгоритма Витерби для фильтрации сигналов, основанных на скрытых марковских моделях со скачкообразным изменением параметров в случайный момент времени (1) - (3). Алгоритм позволяет находить оптимальные по критерию максимального правдоподобия последовательности состояний модели

$$\hat{x}_0^T = \arg \max_{x_0^T} P(x_0^T | y_1^T).$$

Рассматривается частный случай скачкообразного изменения матрицы переходов в случайный момент времени. Для рассматриваемого случая с целью проверки работоспособности проводится моделирование обобщенного алгоритма Витерби и исследуется зависимость точности оценивания

состояний процесса от частоты переключений между состояниями, определяемой матрицей условных вероятностей переходов.

Основываясь на результатах моделирования, можно сделать вывод, что полученный обобщенный алгоритм Витерби для оценивания скрытых марковских процессов в модели с неизвестным временем скачка параметров характеризуется высокой точностью оценивания и хорошим быстродействием.

В п. 2.2 рассматривается задача оценивания апостериорных вероятностей состояния модели  $P(x_k | y_1^T)$  и неизвестного момента появления скачка параметров  $P_\tau(\tau | y_1^T)$ . Данная задача является более общей, чем задача отыскания максимально правдоподобной оценки последовательности состояний  $\{x_k, k = \overline{0, T}\}$ , т.к. наиболее полную информацию об оцениваемом состоянии модели содержит апостериорная вероятность  $P(x_k | y_1^T)$ , найденная при условии, что на интервале времени  $k = \overline{1, T}$  наблюдается процесс  $\{y_k, k = \overline{1, T}\}$ .

Выбирая затем критерий оптимальности, по вероятностям  $P(x_k | y_1^T)$ ,  $P_\tau(\tau | y_1^T)$  можно находить оптимальные оценки момента появления скачка параметров и оценки состояний модели, а также исследовать точности формируемых оценок.

В п. 2.2 для модели (1) - (3), используя математический аппарат теории нелинейной фильтрации марковских случайных процессов, выводятся уравнения алгоритма оценивания апостериорных вероятностей состояния модели  $P(x_k | y_1^T)$  и неизвестного момента появления скачка параметров  $P_\tau(\tau | y_1^T)$ . С целью проверки работоспособности проводится моделирование работы алгоритма для частного случая скачкообразного изменения матрицы переходов в случайный момент времени. По критерию максимального правдоподобия вычисляются оптимальные оценки последовательности скрытых состояний и момент времени появления скачка параметров.

В третьей главе рассматривается задача оценивания изменяющихся параметров модели и времени скачка параметров в модели нестационарных скрытых марковских процессов.

Как и во второй главе, модель задается уравнениями (6) - (8), но при этом предполагается, что параметры модели до момента появления скачка (при  $k \leq \tau$ ) и после появления скачка (при  $k > \tau$ ) не зависят от времени, т.е.

$$a_{ij}^0(k) = a_{ij}^0, \quad a_{ij}^1(k) = a_{ij}^1, \quad b_j^0(Y_m, k) = b_j^0(Y_m), \quad b_j^1(Y_m, k) = b_j^1(Y_m),$$

$(i, j = \overline{1, N}; m = \overline{1, M})$ , но являются неизвестными параметрами модели. Также

неизвестны вероятности начальных значений  $\pi_i^0$  и  $\pi_i^1$ ,  $(i = \overline{1, N})$ . Задача

состоит в том, чтобы по реализации наблюдений  $y_1^T = \{y_k, k = \overline{1, T}\}$  путем

коррекции априорных значений найти оценки параметров, удовлетворяющих критерию локального максимума функции правдоподобия:

$$\max_{\{\pi_i^{0,1}\}, \{a_{ij}^{0,1}\}, \{b_j^{0,1}(Y_m)\}} P\left(y_1^T \mid \{\pi_i^{0,1}\}, \{a_{ij}^{0,1}\}, \{b_j^{0,1}(Y_m)\}\right), \text{ а также вычислить оценку}$$

момента дискретного времени  $\hat{\tau}$ , при котором происходит скачок параметров. Априорные вероятности случайного момента  $\tau$  считаются известными и равными  $P_\tau(\tau)$ ,  $\tau > 0$ .

В п. 3.1 путем обобщения алгоритма Баума-Уелша и используя аппарат марковской теории оптимальной нелинейной фильтрации получены рекуррентные уравнения для нахождения условных вероятностей наблюдений и условных вероятностей переходов между состояниями до и после скачка параметров. Получены уравнения для вычисления апостериорных вероятностей моментов появления скачка параметров. В параграфе представлены результаты моделирования работы алгоритма. В результате последовательных корректировок параметров получены оценки условных вероятностей переходов между состояниями и условных вероятностей наблюдений. Вводя величины суммарных квадратичных ошибок параметров, исследуется точность формируемых оценок условных вероятностей наблюдений, условных вероятностей переходов между

состояниями и момента появления скачка в зависимости от количества последовательных корректировок параметров. Показано, что точность оценивания можно значительно улучшить, увеличивая число последовательных корректировок (переоценок) параметров модели.

В п. 3.2 рассматривается задача оценивания параметров для СММ с непрерывными наблюдениями на фоне аддитивных гауссовых шумов. Здесь предполагается, что распределение наблюдаемой величины может быть представлено суперпозицией гауссовых функций, т.е. условные вероятности наблюдений имеют следующий вид:

$$b_j^0(k, Y) = \sum_{m=1}^M c_{jm}^0 \Omega(Y, \mu_{jm}^0, \sigma_{jm}^0),$$

$$b_j^1(k, Y) = \sum_{m=1}^M c_{jm}^1 \Omega(Y, \mu_{jm}^1, \sigma_{jm}^1),$$

где  $\Omega(Y, \mu, \sigma)$  - функция вида:  $\Omega(Y, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(Y - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$

а для  $c_{jm}^0, c_{jm}^1$  выполняются следующие условия:

$$\sum_{m=1}^M c_{jm}^0 = 1, \sum_{m=1}^M c_{jm}^1 = 1$$

$$c_{jm}^0 \geq 0, c_{jm}^1 \geq 0$$

$$(j = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}).$$

В п. 3.2 выводятся рекуррентные уравнения для нахождения скачкообразно изменяющихся условных вероятностей наблюдений и условных вероятностей переходов между состояниями до и после скачка параметров для скрытых марковских моделей с непрерывными наблюдениями на фоне аддитивных гауссовых шумов и проводится моделирование полученного алгоритма.

В четвертой главе рассматривается вопрос практического применения разработанных алгоритмов в задачах связи для оценивания характеристик каналов без использования тренировочных последовательностей.

В п. 4.1 рассматривается применение алгоритма Баума-Уэлша в задачах оценивания параметров канала связи на примере сетей GSM (рисунок 3).

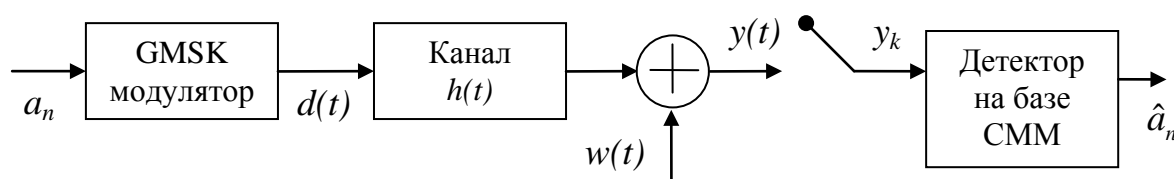


Рисунок 3. Коммуникационная подсистема с GMSK модулятором и детектором на базе скрытых марковских моделей для сетей GSM.

Одним из существенных преимуществ использования подобных систем оценивания параметров канала связи является возможность увеличения емкости канала за счет использования тренировочных последовательностей. Так в случае сети GSM 17% передаваемых данных составляет тренировочные последовательности. Одним из ограничений использования алгоритма Баума-Уэлша является требование стационарности скрытой марковской модели. Однако прием может происходить в условиях резкого изменения характеристик передающего тракта. Для избежания высокого уровня ошибок при нестационарном приеме в ряде работ проводилось разбиение поступающий данных на сегменты.

Проведенное исследование показывает, что при разбиение данных на сегменты возникает проблема недостаточности данных для оценивания характеристик канала связи. Результаты моделирования демонстрируют чем больше длительность наблюдаемой последовательности, тем точнее будет сформирована оценка параметров, тем ниже будет уровень битовых ошибок. При этом, увелечение размера сегмента приводит к ухудшению устойчивости относительно временных изменений характеристик GSM канала. Разработана схема оценивания характеристик канала связи и приема данных на базе скрытых марковских моделей со случайным скачкообразным изменением параметров, которая позволяет задействовать больший объем данных и при этом сохранить устойчивости относительно изменений временных

характеристик GSM канала. Учитывая, что подобная проблема является распространенной, можно сделать вывод о целесообразности применения методов обработки скрытых марковских моделей со случайными скачкообразными изменениями параметров в задачах оценивания характеристик канала связи без использования тренировочных последовательностей.

В заключении приводятся основные результаты работы.

1. Получены уравнения обобщенного алгоритма Витерби для скачкообразно изменяющихся скрытых марковских моделей с дискретными наблюдениями. Проведено моделирование и исследование полученного алгоритма. Проведено сравнение точности оценивания полученного обобщенного алгоритма Витерби и необобщенного алгоритма Витерби в предположении, что момент скачка известен.
2. Получены уравнения обобщенного алгоритма Витерби для скачкообразно изменяющихся скрытых марковских моделей с непрерывными наблюдениями. Проведено численное моделирование полученного алгоритма.
3. Разработан алгоритм для нахождения оптимальных оценок последовательности скрытых состояний дискретнозначных марковских процессов со скачкообразно изменяющимися параметрами в неизвестный момент времени. Оптимальные оценки состояний марковских процессов и момента появления скачка параметров получены в результате интерполяции путем обработки всей последовательности наблюдений. Проведено моделирование полученного алгоритма для частного случая скачкообразного изменения матрицы переходов в случайный момент времени.
4. Получены уравнения алгоритма Баума-Уелша, для оценивания изменяющихся параметров и времени скачка для скрытых марковских моделей с дискретнозначными наблюдениями. Методами марковской теории оптимальной нелинейной фильтрации получены рекуррентные

уравнения для нахождения условных вероятностей наблюдений и условных вероятностей переходов между состояниями до и после скачка параметров. Получены уравнения для вычисления апостериорных вероятностей моментов появления скачка параметров. Проведено моделирование и исследована точность формируемых оценок в зависимости от количества последовательных корректировок параметров. Исследована зависимость точности оценивания параметров от момента появления скачка параметров. Рассмотрен случай оценивания параметров при малой вероятности появления скачка.

5. Выведены уравнения алгоритма оценивания изменяющихся параметров и времени скачка для скрытых марковских моделей с непрерывными наблюдениями на фоне аддитивных гауссовых шумов. Алгоритм позволяет по реализации наблюдений путем коррекции априорных значений параметров найти оценки условных вероятностей переходов и параметры распределения наблюдаемых величин, удовлетворяющих критерию локального максимума функции правдоподобия, а также вычислить оценку момента дискретного времени
6. Рассмотрен вопрос практического применения методов обработки скрытых марковских моделей в задачах оценивания характеристик канала связи без использования тренировочных последовательностей на примере GSM системы. Рассмотрены результаты влияния характера местности и соотношения сигнал шум на уровень битовых ошибок при приеме сигнала.
7. Проведено исследование точности оценивания параметров в зависимости от длины сегмента данных. Показано что, чем больше длительность наблюдаемой последовательности, тем точнее будет сформирована оценка параметров, тем ниже будет уровень битовых ошибок. При этом, увеличение размера сегмента приводит к ухудшению относительно временных изменений характеристик GSM канала.
8. Разработана схема оценивания характеристик канала связи и приема данных на базе скрытых марковских моделей со случайным



скачкообразным изменением параметров, которая позволяет задействовать большой объем данных и при этом сохранить устойчивости относительно изменений временных характеристик канала передачи данных.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Королев А.В., Самылин С.А., Силаев А.М. Исследование алгоритма оценивания импульсных сигналов со случайными моментами появления. //Труды четвертой научной конференции по радиофизике. 5 мая 2000 г. - Ред. А. В. Якимов. С. 269-270.
2. Королев А.В., Силаев А.М. Оптимальное оценивание моментов появления импульсных сигналов в дискретном времени. //Труды (пятой) научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения А.А.Андропова. 7 мая 2001 г. - Ред. А.В.Якимов. - Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2001. С.197–198.
3. Королев А.В., Силаев А.М. Оптимальное оценивание моментов скачкообразных изменений параметров временных рядов. // Сборник материалов VII Международной научно-технической конференции «Математические методы и информационные технологии в экономике». Пенза, 2001. Ч.1. С. 31 - 32.
4. Королев А.В., Силаев А.М. Исследование алгоритма обнаружения пачки импульсов со случайными моментами появления. // Сборник тезисов докладов. Седьмая нижегородская сессия молодых ученых. Н. Новгород, 2002. С. 23-25
5. Королев А.В., Силаев А.М. Алгоритм оптимального оценивания моментов появления импульсных сигналов в дискретном времени. // Изв. вузов - Радиофизика. 2002. Т. 45. № 3. С. 254 – 262.
6. Королев А.В., Силаев А.М. Analysis of the algorithm for detecting group pulses with random moments of appearance. // Тезисы докладов шестой научной конференции по радиофизике. Н.Новгород, ННГУ, 2002, С. 226-227.

7. Королев А.В., Силаев А.М. Алгоритм оценки последовательности состояний скрытых марковских процессов с неизвестным моментом появления скачка параметров. // Сборник докладов 6-й Международной конференции и выставки «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва, 2004, Т. 1, С. 51-54.
8. Королев А.В., Силаев А.М. Алгоритм обнаружения последовательности импульсных сигналов со случайными моментами появления. //Изв. вузов - Радиофизика. 2004. Т.47. № 2. С. 155 – 162.
9. Королев А.В., Силаев А.М. Алгоритм Витерби для модели нестационарных скрытых марковских процессов со случайным скачком параметров. // Материалы тринадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве», Н.Новгород, МВВО АТН РФ, 2004., С 28-29.
- 10.Королев А.В., Силаев А.М. Алгоритм оценки состояний и времени скачка параметров в модели нестационарных скрытых марковских процессов. // Тезисы докладов восьмой научной конференции по радиофизике”. Н.Новгород, ННГУ, 2004, С. 152-153.
- 11.Королев А.В., Силаев А.М. Алгоритм Витерби для моделей скрытых марковских процессов с неизвестным моментом появления скачка параметров. // Изв. вузов - Радиофизика. 2005. Т.48. № 4. С. 358-366.
- 12.Королев А.В., Силаев А.М. Оценивание марковских последовательностей со скачкообразным изменением параметров методом интерполяции. // Изв. вузов - Радиофизика. 2005. Т.48. № 7. С. 620-629.
- 13.Королев А.В., Семашко А.В. Оценивание скачкообразно изменяющихся параметров в модели нестационарных скрытых марковских процессов. //Тезисы докладов пятой международной молодежной научно-технической конференции «Будущее технической науки». - Н.Новгород, 2006, С. 30

- 14.Королев А.В., Семашко А.В. Алгоритм оценивания скачкообразно изменяющихся параметров скрытых марковских моделей. //Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ-2006)». - Н.Новгород, 2006, С.39
- 15.Королев А.В., Семашко А.В. Обобщенный алгоритм Витерби для непрерывных скрытых марковских процессов со случайным скачкообразным изменением параметров. //Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ-2007)». - Н.Новгород, 2007, С.54
- 16.Королев А.В., Семашко А.В. Алгоритм оценивания изменяющихся параметров и времени скачка для скрытых марковских моделей с непрерывными наблюдениями на фоне аддитивных гауссовых шумов. // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ-2008)». - Н.Новгород, 2008, С. 38
- 17.Семашко А.В., Королев А.В. Оценивание скачкообразно изменяющихся параметров в модели нестационарных скрытых марковских процессов. // Информация и космос. – С. Петербург, - 2008, №3 – с. 10-16.