

На правах рукописи

ФОМЕНКО Алексей Юрьевич

РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ СИСТЕМ
СИНХРОНИЗАЦИИ ДЛЯ ВЫСОКОДИНАМИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(в технических системах)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва, 2012

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана на кафедре автономных информационных и управляющих систем.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ,
лауреат Государственной премии СССР
Шахтарин Борис Ильич,

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Антипов Владимир Никитович

кандидат технических наук доцент,
Савинов Валентин Александрович

Ведущая организация: ОАО «Российские космические системы»

Защита состоится «18» сентября 2012 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.141.02 при Московском государственном университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-ая Бауманская, д.5 стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «__» _____ 2012 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Учёный секретарь
диссертационного Совета
к.т.н., доц.



Муратов И.В.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



2000605

Фоменко А.Ю. Разработка оп

- 35

2016

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1 Актуальность работы. В современных устройствах управления, а также в радионавигационных и радиолокационных системах широко применяют системы синхронизации (СС). Они выполняют широкий спектр задач: тактовая синхронизация, когерентная демодуляция сигналов с фазовой и частотной модуляцией, синтез сложных радиотехнических сигналов и т.д.

На фоне общего технического прогресса существенно расширяется применение различных навигационных систем, что требует их непрерывного совершенствования. В ряде современных приложений к навигационным системам предъявляют высокие требования по точности, помехозащищенности, надежности, непрерывности работы и другим показателям качества при высокой динамике движения объекта. Это, в свою очередь, накладывает дополнительные требования к алгоритмам работы СС.

Особое значение при разработке СС имеют проблемы срывов синхронизации при отслеживании быстрофлуктуирующих процессов, а также при воздействии помех различного рода.

Исследование СС существенно усложняется, если наряду с шумовой (флуктуационной) помехой на СС воздействует быстрофлуктуирующий полезный сигнал, когда в СС присутствуют переходные процессы, во время которых переменные состояния существенно отклоняются от установившихся значений. В этом случае нелинейные уравнения, описывающие систему, не могут быть линеаризованы, и их решение существенно усложняется.

Основным методом исследования СС при наличии гауссовского шума на входе в настоящее время является метод марковских случайных процессов. Пионерами использования этих методов применительно к СС являются Р.Л.Стратонович и В.И.Тихонов. Существенный вклад в развитие теории синхронизации при наличии гауссовского шума на входе сделали Б.И. Шахтарин, Г.И. Тузов, В. Линдсей, А.Д. Витерби, Дж. Холмс, Н.Н. Удалов и другие. В результате к настоящему времени теория непрерывных СС при наличии шумовых воздействий в основном завершена.

И Г Р У

ин.Н.Э. Баумана

БИБЛИОТЕКА

остается практически не проработанным вопрос минимизации вероятности срывов слежения СС при работе с полезным сигналом, имеющим быстрофлуктуирующие информационные параметры.

Например, в синтезируемых традиционных схемах фазовой автоподстройки (ФАП) возможен срыв слежения за фазой сигнала при превышении фазовой ошибки интервала однозначности фазового дискриминатора (для схемы Костаса этот интервал равен $\pm\pi/4$). В связи с этим в настоящее время полосу корректирующего фильтра ФАП часто приходится выбирать, не исходя из максимизации отношения сигнал/шум, а таким образом, чтобы максимальная динамическая ошибка слежения за фазой сигнала не превышала интервала однозначности фазового дискриминатора. Уменьшение динамической ошибки слежения возможно за счет расширения полосы частот фильтра ФАП, а это, в свою очередь приводит к росту флуктуационной ошибки слежения за фазой.

Подобную ситуацию можно объяснить следующими причинами. Во-первых, строгий синтез устойчивой к срывам слежения СС представляет собой достаточно сложную математическую задачу, несмотря на то, что при синтезе может использоваться известный аппарат теории нелинейной фильтрации Стратоновича. Во-вторых, для многих исследователей ситуация выбора компромисса между флуктуационной и динамической ошибкой, т.е. нахождение некоторой оптимальной полосы частот фильтра, считалась неизбежной. Это подтверждает тот факт, что в литературе даже отсутствуют попытки сформулировать задачу для синтеза обнаружителя срывов колебаний. В-третьих, актуальность подобных расчетов возникла относительно недавно из-за постепенного повышения требований к СС.

Задача исследования статистической динамики схемы слежения за задержкой (ССЗ), входящей в состав оптимального когерентного демодулятора псевдощумового сигнала, в настоящее время решена не полностью. Отсутствуют замкнутые аналитические выражения для целого ряда практически важных характеристик схемы, таких как среднее время до срыва

синхронизации, ковариационная матрица переменных состояния и т.п.. Подразумевается, но до сих пор не проведена формально аналогия с фазовой автоматической системой (ФАС), хотя от последней ССЗ отличается лишь специфической формой дискриминационной характеристики. Практически нет работ, которые охватывали бы все применяемые на практике типы фильтров: интегрирующий (ИФ), пропорционально-интегрирующий (ПИФ) и вырожденный пропорционально-интегрирующий (ВПИФ).

В связи с вышеизложенным, тема диссертации, посвященной разработке оптимальных алгоритмов СС для высокодинамичных объектов, является достаточно актуальной.

2 Цель работы: создание оптимальных алгоритмов работы систем синхронизации для высокодинамичных объектов

3 Задачи, решаемые в диссертации. Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие задачи:

- 3.1 Синтез оптимального приемника фазоманипулированного сигнала при учете флуктуации частоты.
- 3.2 Синтез оптимального приемника фазоманипулированного сигнала при флуктуации по фазе, задержке и амплитуде.
- 3.3 Анализ ССЗ второго и третьего порядка с точки зрения максимизации среднего времени до срыва колебаний.
- 3.4 Синтез оптимальных систем фазовой синхронизации на основе метода нелинейной оптимальной фильтрации.
- 3.5 Синтез структурной схемы оптимального обнаружителя срыва слежения по фазе.
- 3.6 Анализ помехоустойчивости оптимального обнаружителя срыва слежения по фазе.
- 3.7 Анализ двухдискриминаторной схемы фазовой автоподстройки (ФАП)

4 Научная новизна результатов.

4.1 Впервые синтезирована двухдискриминаторная схема ФАП, обеспечивающая существенный выигрыш в точности и помехоустойчивости системы при сохранении тех же динамических свойств, что и традиционные ФАП.

4.2 Разработана имитационная модель, позволяющая проводить всесторонний анализ различных систем ФАП, в том числе двухдискриминаторной ФАП.

4.3 Разработана имитационная модель ССЗ, построенной по принципу early-late.

4.4 Разработана комбинированная имитационная модель ССЗ и ФАП, позволившая проанализировать влияние ошибок слежения СС.

5 Положения, выносимые на защиту.

5.1 Синтезированная автором двухдискриминаторная схема ФАП, обеспечивающая существенный выигрыш в точности и помехоустойчивости системы при сохранении тех же динамических свойств, что и традиционные ФАП.

5.2 Процедура синтеза двухдискриминаторной ФАП.

5.3 Сравнительные характеристики традиционных и двухдискриминаторной ФАП.

5.4 Имитационные модели для анализа систем ФАП

5.5 Имитационная комбинированная модель ССЗ и ФАП.

5.6 Рекомендации по выбору оптимальных алгоритмов СС для высокодинамичных объектов.

6 Общая методика исследований. Разрабатываемые в диссертации методы синтеза СС базируются на аппарате теории нелинейной фильтрации Стратоновича. Анализ динамических и статистических характеристик СС базируется на общих положениях теории систем автоматического управления.

Для решения поставленных задач используется компьютерное моделирование разработанных автором имитационных моделей.

Разработанные методы и алгоритмы анализа статистических характеристик СС написаны в программе MATLAB и ориентированы на использование персональных компьютеров.

7 Практическая ценность диссертации:

7.1 Впервые предложена двухдискриминаторная схема ФАП, в которой отсутствует необходимость поиска компромисса между флуктуационной и динамической ошибкой, и, как следствие, предложенная схема позволила достичь существенно меньшую (до трех раз) флуктуационную ошибку слежения без увеличения вероятности срыва слежения за фазой. Двухдискриминаторная схема ФАП может применяться, например, в радионавигационной аппаратуре высокодинамичных объектов.

7.2 В диссертации разработана процедура синтеза двухдискриминаторной схемы ФАП, оптимальной с точки зрения минимума вероятности срыва слежения за фазой. Данная методика может быть использована в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах при проектировании радиоэлектронных систем, работающих с сигналом с быстрофлуктуирующими информационными параметрами.

7.3 На основе разработанных методик и алгоритмов автором создано несколько имитационных моделей, оформленных в виде программного обеспечения в MATLAB. Разработанные программы позволяют оптимизировать параметры фильтров в цепях обратной связи, рассчитать вероятность срыва слежения и флуктуационную ошибку слежения за фазой.

8 Внедрение результатов работы.

8.1 Результаты диссертации использованы:

8.1.1 в НИР «Фундаментальные проблемы создания автономных информационных и управляющих систем». Шифр «Кедр-5». Научный руководитель Борзов А.Б.: ГРН: 012-009-648-25. – М.: 2010, о чем свидетельствует акт о внедрении;

8.1.2 в НИР, проводимой организацией ОАО «Концерн «Созвездие», что подтверждено актом о внедрении;

8.2. Результаты диссертации внедрены:

8.2.1 в учебный процесс на кафедре «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждено актом о внедрении;

8.2.2. в учебный процесс в Институте криптографии, связи и информатики (ИКСИ) Академии ФСБ РФ;

8.2.3. в учебный процесс ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», что подтверждено актом о внедрении;

8.3. На основании результатов диссертации созданы имитационные модели СС, которые используются в лабораторных работах на кафедре «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

8.4. Результаты диссертации опубликованы в учебных пособиях [1, 2], что подтверждено актом о внедрении.

9 Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на 16-ой Международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (5 – 8 октября 2010 года, г. Рязань), 53-ей научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук» (20-29 ноября 2010 года, г. Долгопрудный), на конференциях и семинарах кафедры СМ-5, а также кафедры компьютерной математики и программирования ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

10 Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 7 работах, из них 3 опубликованы в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК.

11 Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (80 наименований), приложения и изложена на 158 листах машинописного текста, включая 61 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертации: обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы и поставлены задачи исследования, кратко изложено содержание работы, проведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе производится синтез оптимальных СС по фазе и задержке сигналов на основании теории нелинейной фильтрации Стратоновича.

Рассматривается следующая модель принимаемого сигнала:

$$s(t) = a_0 f(t - \tau) \cos(\omega_0 t + \theta), \quad (1)$$

где $a_0 = \text{const}$; $f(t) = \sum_{k=1}^L a_k \text{rect}[t - (k-1)\tau_n]$; θ и τ определяются априорными ДУ следующего вида:

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = -\alpha(\theta - \theta_0) + \xi_1, \\ \frac{d\tau}{dt} = -\beta(\tau - \tau_0) + \xi_2 \end{cases} \quad (2)$$

В последнем выражении коэффициенты α и β определяют ширину энергетического спектра случайных параметров θ и τ , а ξ_1 и ξ_2 — два независимых ($N_{\tau\theta} = 0$) стационарных белых шума, имеющих корреляционные функции

$$R_1(\tau) = \frac{1}{2} N_\theta \delta(\tau); \quad R_2(\tau) = \frac{1}{2} N_\tau \delta(\tau). \quad (3)$$

В уравнениях (2) θ_0 и τ_0 — известные постоянные значения параметров сигнала.

Структурная схема синтезированной системы приведена на рисунке 1.

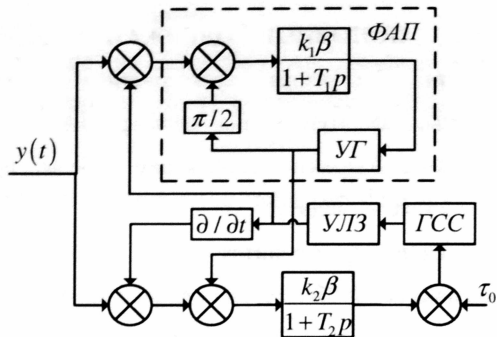


Рисунок 1 – Структурная схема СС по фазе и задержке сигналов

Производится аналогичный синтез СС при условии, что на входе присутствует фазоманипулированный сигнал с флуктуирующей частотой. Было показано, что усложнение модели принимаемого сигнала приводит к появлению цепи ФАП дополнительного фильтра.

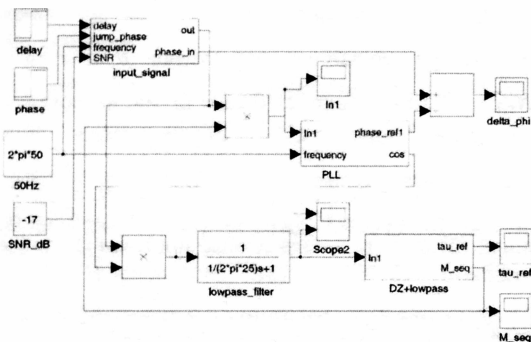


Рисунок 2 – Имитационная модель комбинированной СС по фазе и задержке

В диссертации была построена имитационная модель, позволяющая моделировать работу комбинированной СС по фазе и задержке и анализировать следующие параметры:

- влияние отношения сигнал/шум в канале приема на точность синхронизации;

- влияние ошибок синхронизации по фазе на корректность работы системы синхронизации по задержке и наоборот.

Имитационная модель приведена на рисунке 2.

Было установлено, что в системе ФАП в зависимости от ширины полосы фильтра длительность переходного процесса составляет от 5 до 9 периодов несущего колебания. В системе синхронизации по задержке (ССЗ) длительность переходного процесса может составлять от 5 - 6 периодов кодовой последовательности, когда ошибка слежения в системе ФАП равна нулю, до 20 и более периодов, когда присутствует ошибки синхронизации по фазе. При этом ошибки в ССЗ практически не влияют на длительность переходного процесса в ФАП.

В ходе отладки модели было установлено, что без существенной потери точности результатов моделирование комбинированной СС петли синхронизации по фазе и задержке можно разделить и производить их анализ независимо друг от друга. Такой подход существенно упрощает процедуру анализа, при этом влияние ошибок синхронизации петель друг на друга можно учесть, введя соответствующие поправочные коэффициенты в каждую модель.

На основании предложенного подхода в главах 2 и 3 было произведен раздельный синтез и анализ СС по фазе и задержки.

Во второй главе производилась оптимизация параметров схемы слежения за задержкой по критерию максимума среднего времени до срыва синхронизации. Полученные результаты затем проверялись путем моделирования.

Рассматривалась система 2-го порядка, математическая модель которой имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{d\tau} &= y + b + \varepsilon_0 \left[R(x) + \sqrt{\frac{2}{\rho}} \frac{dW}{d\tau} \right] \\ \frac{dy}{d\tau} &= -\alpha y + -(1 - \alpha \varepsilon_0) \left[R(x) + \sqrt{\frac{2}{\rho}} \frac{dW}{d\tau} \right]\end{aligned}\quad (4)$$

где $\tau = \omega t$ – нормированное время (t – физическое время, ω – собственная частота системы); $x(\tau)$, $y(\tau)$ – переменные состояния; $W(\tau)$ – стандартный винеровский случайный процесс.

Было показано, что среднее время до срыва слежения определяется выражением

$$T_c \approx \exp(rH\psi), \quad (5)$$

где r – отношение сигнал/шум, параметр $H\psi$ – параметр, зависящий от параметра фильтра в цепи обратной связи СС, который может быть определен из графиков, приведенных в диссертации.

Рассмотрена построенная автором имитационная модель для анализа среднего времени до срыва слежений СС по задержке, рассмотренной в предыдущем разделе. В ходе моделирования было исследовано среднее время до срыва колебаний, получены графики, подтверждающие правильность теоретических расчетов.

Аналогичным образом производилась оптимизация СС за задержкой третьего порядка. Проводился ее анализ путем моделирования.

В третьей главе был произведен синтез оптимальных систем фазовой синхронизации с использованием методов нелинейной оптимальной фильтрации, проведено их имитационное моделирование.

Произведен синтез СС при следующей постановке задачи:

Уравнение наблюдения было задано в виде

$$x(t) = s(t, \varphi) + n(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + \varphi(t)] + n(t). \quad (6)$$

Априорное ДУ было задано винеровским случайным процессом $\varphi(t)$ в виде

$$\frac{d\varphi}{dt} = n_\varphi(t). \quad (7)$$

В результате была получена система дифференциальных уравнений оптимальной фильтрации:

$$\frac{d\hat{\varphi}}{dt} + \sigma^2(t) \frac{2A_0}{N_0} x(t) \sin(\omega_0 t + \hat{\varphi}) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{d\sigma^2}{dt} + \sigma^4 \frac{2A_0}{N_0} x(t) \cos(\omega_0 t + \hat{\varphi}) = \frac{N_\varphi}{2} \quad (9)$$

Этим уравнениям соответствует СС со следующей структурной схемой.

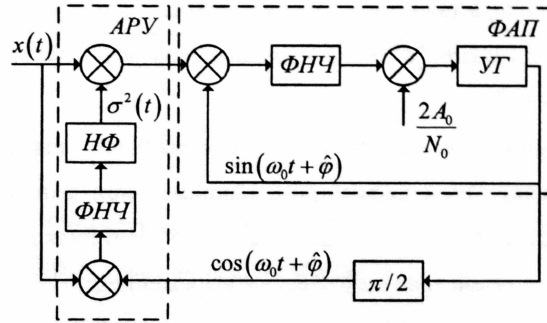


Рисунок 3- Структурная схема СС по фазе

Далее производилось моделирование полученной ранее СС по фазе. Было показано, что с расширением полосы фильтра системы ФАП наблюдается уменьшение динамической ошибки слежения при увеличении флуктуационной ошибки. Производился расчет оптимальных полос фильтра системы ФАП при отношении сигнал-шум от -60 до 0 дБ. В диссертации приведены графики зависимости оптимального отношения полосы фильтра ФАП к полосе флуктуации от отношения сигнал -шум. Исследуется зависимость вероятности срывов слежения по фазе от полосы фильтра ФАП и отношения сигнал-шум.

Также рассматривался другой практически важный случай, когда полезный сигнал

$$s(x_{1t}, t) = A_0 \sin(\omega_0 t + x_{1t}) \quad (10)$$

является частотно-модулированным процессом, для которого изменения фазы и частоты описываются уравнениями:

$$\dot{x}_{1t} = x_{2t}, \quad \dot{x}_{2t} = -\alpha x_{2t} + \omega_t; \quad (11)$$

$$E(\omega_t) = 0, \quad R_\omega(\tau) = Q\delta(\tau) \quad (12)$$

В ходе синтеза была получена оценочно-корреляционная система, в которой блок оценки также представлен схемой ФАП. В отличие от предыдущего случая, здесь в цепи обратной связи ФАП имеется пропорционально-интегрирующий фильтр. Система наряду с обнаружением формирует оценку фазы радиосигнала, а также оценку его частоты.

Синтезированная система анализировалась путем имитационного моделирования СС.

Далее производился синтез СС оптимальной для приема сигнала с двузначным дискретным параметром, например при манипуляции параметра сигнала. В частности, рассматривалась 2-ФМ манипуляция сигнала. В этом случае входное воздействие описывалось выражением:

$$x(t) = s(t, \varphi, \alpha) + n(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + \varphi(t) + \alpha\pi] + n(t), \quad (13)$$

где α принимает значение 0 или 1.

Такая постановка задачи приводит к схеме Костаса, приведенной на рисунке 4.

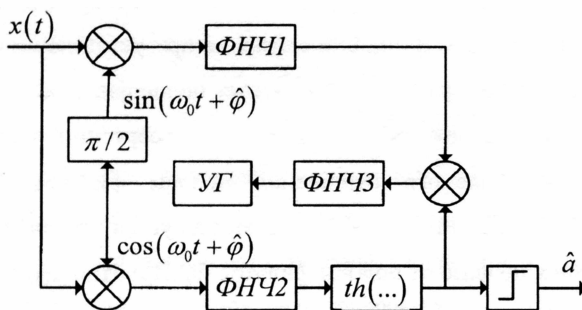


Рисунок 4 – Схема Костаса

Анализ схемы Костаса также производился путем имитационного моделирования.

В конце главы 3 сделан сравнительный анализ рассмотренных СС.

В четвертой главе произведен синтез и имитационное моделирование предложенной автором двухдискриминаторной схемы ФАП.

Произведен синтез предложенной автором двухдискриминаторной схемы ФАП. В ходе синтеза была получена структурная схема оптимального обнаружителя срывов слежения системы ФАП, приведенная на рисунке 5.

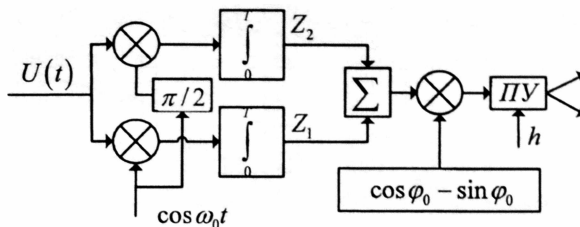


Рисунок 5 – Структурная схема оптимального обнаружителя срыва слежения системы ФАП

Структурная схема двухдискриминаторной ФАП была получена путем включения в схему Костаса оптимального обнаружителя срыва слежения и внесения в цепь обратной связи блок коррекции обратной связи (БКОС). Структурная схема двухдискриминаторной ФАП приведена на рисунке 6.

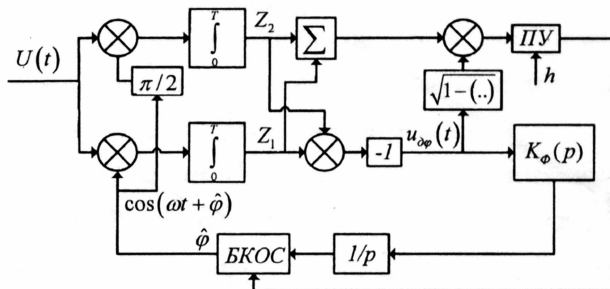


Рисунок 6 – Структурная схема двухдискриминаторной схемы ФАП

Произведен анализ помехоустойчивости оптимального обнаружителя срыва слежения по фазе. На рисунке 7 приведены графики зависимости коэффициента подавления $K_{\text{под}}$ от полной вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ при разных значениях рассогласования фазы принимаемого сигнала с фазой опорного сигнала $\varphi_0(t)$.

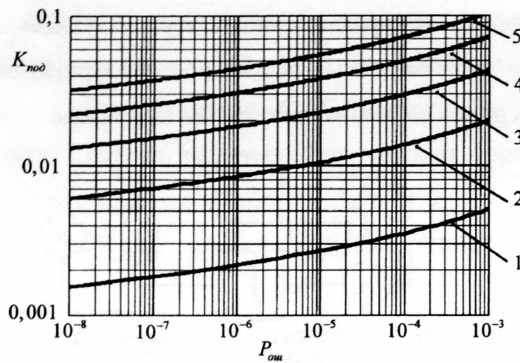


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента подавления $K_{\text{под}}$ от полной вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ при разных значениях $\varphi_0(t)$. Кривые 1-5 соответствуют φ_0 : $0, \pi/20, \pi/10, 3\pi/20, \pi/5$.

Также было произведено моделирование двухдискриминаторной схемы ФАП с последующим сравнением ее работы с ФАП, построенной по традиционной схеме.

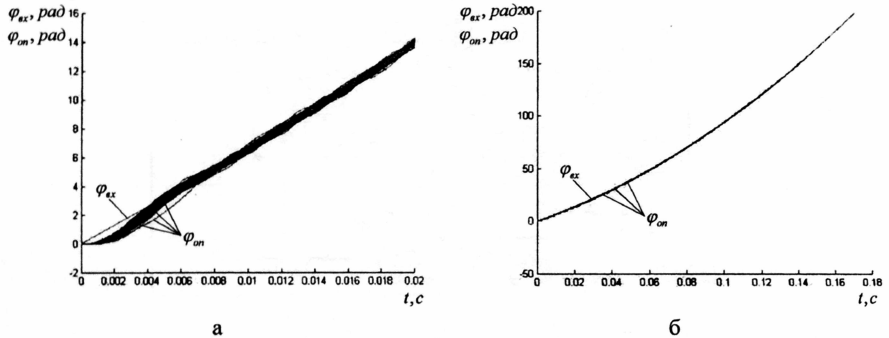


Рисунок 8 – Зависимость фазы входного и опорного сигнала фазового дискриминатора от времени традиционной ФАП (а) и двухдискриминаторной ФАП (б).

На рисунке 8 показана зависимость фазы входного и опорного сигнала фазового дискриминатора от времени традиционной ФАП и двухдискриминаторной ФАП.

В процессе моделирования было установлено, что среднее квадратическое отклонение оценки фазы уменьшилось по сравнению с традиционной схемой ФАП в 2,7 раза.

Основные результаты и выводы

1. Произведен синтез оптимального приемника фазоманипулированного сигнала при учете флуктуации частоты, построена имитационная модель, произведено моделирование работы приемника при наличии на входе сигнала с быстрофлуктуирующей фазой;
2. Произведен синтез оптимального приемника фазоманипулированного сигнала при флуктуации по фазе, задержке и амплитуде, построена имитационная модель, исследовано влияние ошибок синхронизации по задержке на работу СС по фазе, показана возможность раздельного анализа СС по фазе и задержке;
3. Произведен анализ СС по задержке второго и третьего порядка с точки зрения максимизации среднего времени до срыва колебаний, для проверки выполненных расчетов построена имитационная модель;
4. Произведен синтез оптимальных систем фазовой синхронизации на основе метода нелинейной оптимальной фильтрации, для каждой СС построена имитационная модель, произведено моделирование работы приемника при наличии на входе сигнала с быстрофлуктуирующей фазой, исследованы процессы срыва слежения за фазой;
5. Произведен синтез структурной схемы оптимального обнаружителя срыва слежения по фазе, произведен анализ его помехоустойчивости, произведена оптимизация обнаружителя срыва с точки зрения минимизации вычислительных затрат.
6. Предложена двухдискриминаторная схема ФАП, обеспечивающая существенный выигрыш в точности и помехоустойчивости системы при

сохранении тех же динамических свойств, что и традиционные ФАП, выполнен ее анализ с помощью построенных имитационных моделей, произведен сравнительный анализ с традиционными схемами ФАП.

7. Разработана процедура синтеза двухдискриминаторной ФАП.

8. Предложены рекомендации по выбору оптимальных алгоритмов СС для высокодинамичных объектов.

Основные результаты диссертации представлены в работах:

1 Синхронизация в радиосвязи и радионавигации: Учебн. Пособие / Б.И. Шахтарин [и др.] – М.: Горячая линия-Телеком, 2011. – 278 с.

2 Оптимальные фильтры и оценка спектров случайных процессов: Электронное учебное издание . / Б.И. Шахтарин [и др.] – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – Ч.2. – 50 с.

3 Шахтарин Б.И., Фоменко А.Ю. Синтез двухдискриминаторной системы фазовой автоподстройки // Радиотехника и электроника. – 2012. – №7. – с. 765-770.

4 Шахтарин Б.И., Фоменко А.Ю. Синтез и моделирование схемы Костаса // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Приборостроение. – 2012. – №2. – с. 122-126.

6 Шахтарин Б.И., Фоменко А.Ю. Исследование точностных характеристик схемы слежения за фазой сигнала навигационного приемника при наличии априорной информации о частоте принимаемого сигнала // Научный вестник МГТУ ГА, Радиофизика и радиотехника. – 2010. – №158(8). – с. 22-27

7. Фоменко А.Ю. Исследование двухдискриминаторной схемы ФАПЧ // Сборник научных работ 53-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». – 2010. – Часть 1. Том 2. – С. 92-93.

Соискатель



Фоменко А.Ю