

На правах рукописи



УДК 629.058

ШАВРИН ВЯЧЕСЛАВ ВЛАДИМИРОВИЧ

**СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ФИЛЬТРАЦИИ РАДИО-
НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ СРНС В СИСТЕМЕ
НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ГЕОСТАЦИОНАР-
НОЙ И ВЫСОКОЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ОРБИТАХ**

Специальность 05.12.14 – «Радиолокация и радионавигация»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель: **Тисленко Владимир Ильич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехнических систем, ТУСУР, главный научный сотрудник НИИ РТС ТУСУР

Официальные оппоненты: **Михайлов Виктор Фёдорович**, доктор технических наук, профессор Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» («СПб ГУАП»)
Пудловский Владимир Борисович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»).

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Сибирский федеральный университет**»

Защита состоится «20» декабря 2019 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.04 на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу: г. Томск, пр-т Ленина, 40, ТУСУР, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР по адресу: 634034, г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте ТУСУР: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/qfa9807b>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные составителем и заверенные гербовой печатью организации, просим высылать по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ТУСУР.

Автореферат разослан «20» октября 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.268.04,
доктор технических наук, профессор



Ю.П. Акулиничев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Навигация объекта в пространстве с помощью спутниковых радионавигационных систем (СРНС) востребована повсеместно: навигация автомобилей, воздушных и водных судов, навигация пешеходов (включая навигацию внутри зданий), космическая навигация, навигация беспилотных подвижных объектов. В связи с этим проектирование навигационной аппаратуры потребителей (НАП) для реализации этих задач является одним из приоритетных направлений.

В эру активного освоения околоземного космического пространства актуальной является задача координатно-временного обеспечения космических аппаратов (КА). Традиционно она решается с помощью наземных комплексов контроля и управления. Но в связи с активным ростом производительности вычислительной аппаратуры и уменьшением её массогабаритных характеристик, эта задача может быть решена с помощью создания систем автономной навигации (САН) КА, которая не использует сигналы наземных комплексов контроля и управления. САН обрабатывает сигналы от различных источников навигационной информации и формирует оценки координат, скоростей и временных поправок для шкалы времени КА – решение навигационной задачи. Одним из основных источников этой информации в околоземном пространстве являются сигналы СРНС.

Для решения навигационной задачи в СРНС наиболее часто применяют псевдодальномерный и псевдораздально-скоростной навигационные методы [1]. Для реализации этих методов предварительно необходимо сформировать оценки радионавигационных параметров (РНП): $\hat{\tau}$ — оценку псевдо-задержки, \hat{f}_D — оценку псевдодоплеровского смещения частоты и оценку $\hat{\phi}_0$ начальной фазы несущей радиосигнала (в когерентном режиме слежения). Точность навигационного решения зависит от качества оценок $\hat{\tau}$ и \hat{f}_D . Оценки $\hat{\phi}_{0,k}$, $\hat{f}_{D,k}$, $\hat{\tau}_k$ в момент времени k формируются в режиме слежения на выходе следящих систем (СС).

Для получения одномоментного решения навигационной задачи одновременно необходимо иметь оценки РНП как минимум от 4 навигационных космических аппаратов (НКА). Для КА на геостационарных (ГСО) и высокоэллиптических (ВЭО) орбитах, мощности принимаемых сигналов СРНС могут опускаться до уровня $P_c = q_{dBW} = -180 \div -190$ дБВт или, что эквивалентно, $q \square C / N_0 = P_c - N_0 \approx 13 \div 23$ дБ-Гц. Синтез СС необходимо проводить с учётом этих условий. В противном случае, при работе по одной из существующих СРНС оценки РНП либо будут обладать низким качеством, либо их количества будет недостаточно для решения задачи навигации – разрывное навигационное поле. Если же допустить наличие в САН цепей слежения, способных работать в более широком динамическом диапазоне, — с учётом сигналов, принимаемых на боковые лепестки диаграмм направленности антенн, то навигационное поле будет неразрывным даже при работе по одной из существующих СРНС. Таким

образом, синтез контуров слежения и следящих фильтров за РНП для «слабых» сигналов СРНС для САН КА является важной и актуальной задачей.

Актуальность темы разработки цепей слежения и следящих фильтров за РНП, способных функционировать в условиях низкой мощности принимаемых сигналов СРНС, подтверждается большим интересом со стороны исследователей и разработчиков НАП за последние 20 лет. Существенный вклад в разработку алгоритмов слежения за РНП внесли такие североамериканские авторы как: M.G. Petovello, C. O'Driscoll, G. Lachapelle, D. Borio, M.L. Psiaki, N. I. Ziedan, J. L. Garrison, A. Soloviev, F. van Grass и другие. Также последние 10 лет активные исследования в этой области проводят группы китайских авторов. Среди отечественных исследователей и разработчиков радионавигационных систем значимый вклад внесли профессора Харисов В.Н., Перов А.И. и коллектив кафедры РТС университета «МЭИ» под его руководством [1].

В литературе выделяют два способа решения *навигационной* задачи в НАП:

- «скалярный» (*scalar-based*) [2]. В отечественной литературе «скалярные» алгоритмы известны как приёмники с двухэтапной обработкой сигналов [1];
- «векторный» (*vector-based*) [2]. В отечественной литературе – схемы с одноэтапной обработкой сигналов [1, 3].

При этом, по существу можно выделить два варианта реализации СС для «скалярного» способа построения НАП:

- «традиционный», при котором СС состоит из корреляторов, дискриминаторов РНП, цифрового фильтра и опорного управляемого цифрового генератора сигнала (УЦГС) [1];
- вариант построения СС, в котором сигнал для УЦГС формируется на выходе *нелинейного* фильтра Калмана, входными сигналами которого (наблюдениями) являются *непосредственно* выходы корреляторов [4].

Решение задачи синтеза в первом варианте выполняется в два этапа. Первый из них определяет структуру оптимального дискриминатора, реализующего максимально правдоподобную оценку РНП. Второй этап решает задачу синтеза оптимального линейного фильтра в контуре СС [1].

Во втором варианте синтез СС за РНП фактически выполняется в один этап. Здесь *объектом синтеза выступает нелинейный следящий фильтр*. В этом варианте построения СС дискриминация по параметрам реализуется в неявном виде «внутри» алгоритма нелинейной обработки выходных сигналов корреляторов. При этом в структуре СС *не содержится отдельной блок дискриминаторов РНП*.

В дальнейшем в тексте «традиционную» схему слежения с дискриминаторами и линейным фильтром будем называть – СС «первого типа». Схему слежения, состоящую из корреляторов и *нелинейного* фильтра Калмана, будем обозначать – СС за РНП «второго типа». В зарубежной литературе для указанного подхода к построению СС используют термин «*correlation based Kalman filter tracking loop*» [4].

В отечественной литературе нет исследований, посвящённых способу построения СС, состоящей из корреляторов, следящего фильтра, опорного УЦГС

и не содержащей типовых дискриминаторов РНП. Отметим, что существует ряд работ, посвящённых непосредственной оценке РНП *сигнала на промежуточной частоте* (ПЧ). В этих исследованиях авторы так же не используют дискриминаторы по оцениваемым параметрам. В них авторы применяют методы траекторной фильтрации, нелинейной марковской фильтрации, а также оптимального фильтра Стратоновича для оценок отдельных РНП: либо фазы $\hat{\varphi}$ и (или) частоты Доплера \hat{f}_D , либо частоты Доплера \hat{f}_D и задержки $\hat{\tau}$, при этом предполагается, что оставшиеся РНП известны. В то же время совместная оценка всех радионавигационных параметров ($\lambda = \{\varphi \quad f_D \quad \tau \quad q_{dBW}\}^T$) не рассматривается.

В зарубежных источниках решение задачи синтеза СС «второго типа», которая позволяет оптимизировать алгоритм формирования совместных оценок РНП сигналов представлено, в частности, в [2, 4, 5]. Показано, что данный вариант построения СС позволяет получать совместные оценки РНП при энергетике сигнала, характерной для КА на ГСО и ВЭО. Это достигается за счёт непосредственной обработки отчётов с корреляторов в более сложном *нелинейном* следящем фильтре Калмана.

Однако, несмотря на то, что синтез схемы слежения за РНП, содержащий корреляторы и *нелинейный* фильтр, был предложен ещё в 2002–2003 годах [4, 5], данные по статистическим и вероятностным характеристикам в литературе носят разрозненный характер. Для случая *некогерентной* обработки вариант построения СС «второго типа» не рассмотрен. В литературе отсутствуют данные о сравнительных характеристиках качества схем слежения «первого» и «второго» типа.

В диссертационной работе объектом исследования выступает **следящая система за РНП**, состоящая из корреляторов и *нелинейного* фильтра. В работе выполнено исследование условий её функционирования, определены статистические и вероятностные характеристики оценок в режиме захвата и слежения, предложены варианты адаптивной обработки, позволяющие расширить рабочий диапазон СС.

Главным фактором, ограничивающим точность любых измерительных систем, являются случайные возмущения, проявляющиеся в наблюдаемых сигналах. Задача фильтрации – выделение полезного сообщения λ из принимаемого сигнала на фоне случайных возмущений. Она реализуется с применением статистических методов обработки измерений. Современная методология статистического анализа и синтеза устройств обработки наблюдаемых сигналов сформировалась на основе фундаментальных результатов теории марковских процессов, определяемых стохастическими дифференциальными уравнениями. Результаты теории изложены в 60–70-х годах прошлого века в трудах Стратоновича Р.Л. и Р. Калмана. Вклад ученых России представлен в известных монографиях М.А. Миронова, С.В. Первачева, А.И. Перова, В.С. Пугачева, Ю.Г. Согулина, В.И. Тихонова, В.Н. Харисова, М.С. Ярлыкова.

Для полностью линейных систем широкое практическое применение находит оптимальный по критерию минимума среднеквадратического отклонения оценки алгоритм линейного фильтра Калмана (ЛФК). Для нелинейных систем в предположении гауссовой аппроксимации апостериорной плотности распределения вероятностей (АПРВ) применение методологии ЛФК привело к появлению расширенного фильтра Калмана (*extended Kalman filter, EKF*) и его модификациям. В результате линеаризации нелинейных функций в точке текущей оценки состояния, необходимой для реализации *EKF*, возникают смещение оценок и погрешности вычисления ковариационных матриц и текущих оценок фильтрации состояния. Более корректно решение нелинейных задач фильтрации выполняется при использовании класса сигма-точечных алгоритмов фильтра Калмана [6] (*sigma-point Kalman Filter, SPKF*). Сигма-точечные алгоритмы предполагают статистическую аппроксимацию гауссовой АПРВ с помощью конечного множества сигма-точек χ_i . Эти методы не требуют аналитического вычисления производных от нелинейных функций, описывающих эволюцию системы. Данный класс методов получил развитие в последние двадцать лет и является сравнительно *новым и актуальным для исследования в задаче построения следящих фильтров* оценки РНП.

Таким образом, **актуальной является задача синтеза алгоритмов слежения за РНП** для навигации КА, находящегося на ГСО и ВЭО, *с применением последних достижений марковской теории нелинейной фильтрации*; исследование области применимости и характеристик синтезированных алгоритмов.

Цель диссертационной работы состоит в решении задачи синтеза алгоритмов совместной оценки радионавигационных параметров сигналов СРНС в следящем контуре приёмника системы автономной навигации в условиях движения КА на ГСО и ВЭО.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие **задачи**:

- 1) обзор и анализ существующих способов построения СС;
- 2) Исследование алгоритма формирования совместных оценок РНП в *когерентном* режиме приёма;
- 3) Синтез алгоритма формирования совместных оценок РНП в *некогерентном* режиме приёма;
- 4) разработка способа *адаптации к неизвестным начальным параметрам сигнала* для расширения области применимости алгоритмов слежения в плане снижения энергетики обрабатываемых сигналов СРНС;
- 5) анализ статистических характеристик процессов в контуре слежения при различных способах его построения;
- 6) проведение экспериментальных исследований разработанных алгоритмов обработки в *когерентном и некогерентном* режимах.

Методы исследования

При решении поставленных задач использованы методы теории вероятностей и математической статистики, методы статистической теории радиотехнических систем, теории оптимальной фильтрации случайных процессов, имита-

ционного компьютерного моделирования, вычислительной математики, программирования.

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1. Выполнен синтез алгоритмов формирования совместных квазиоптимальных оценок РНП в режиме слежения при обработке сигналов с выходов корреляторов в бортовом приёмнике КА при полёте на ГСО и ВЭО. Задача решена на основе современных подходов марковской теории нелинейной фильтрации.

2. Предложен способ адаптации к неизвестным начальным параметрам сигнала для схемы слежения «второго типа», функционирующей в *когерентном* режиме.

3. Предложен алгоритм оценки РНП для СС «второго типа», функционирующей в *некогерентном* режиме, с применением методов марковской теории нелинейной фильтрации.

4. Исследованы статистические характеристики оценок РНП и вероятностные характеристики событий «захват на сопровождение» и «срыв слежения» для алгоритмов оценки РНП при различных способах построения СС. Выполнено сравнение полученных характеристик с соответствующими параметрами в следящей системе, состоящей из типовых дискриминаторов РНП и *линейного* фильтр Калмана.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные алгоритмы построения следящих фильтров в СС позволяют получать оценки РНП при функционировании НАП в условиях низкой энергетики, характерной для ГСО и ВЭО. Результаты работы представляют интерес при проектировании навигационных приёмников, использующих сигналы с BPSK и (или) BOC модуляцией как для космического, так и для наземного потребителя. Они необходимы при выборе оптимальной структуры контура слежения за РНП. Выполнена экспериментальная проверка разработанных алгоритмов.

Положения, выносимые на защиту

1. Схема с корреляторами и *нелинейным* сигма-точечным фильтром Калмана в условиях движения КА на ГСО и ВЭО обеспечивает слежение за РНП в *когерентном* режиме при уменьшении C / N_0 до **17** дБ-Гц и $T=20$ мс. При наличии пилот-сигнала L1OCp (BOC(1,1)) и времени накопления на одном периоде ПСП L1OCp система сохраняет работоспособность при уменьшении C / N_0 до значений **10** дБ-Гц.

2. Предложенная адаптация к неизвестным начальным параметрам в схеме слежения «второго типа» при $T=10$ мс и $C / N_0 \geq 23$ дБ-Гц обеспечивает повышение вероятности вхождения в режим слежения до **30%** по сравнению с неадаптивным вариантом и допускает начальные рассогласования по частоте Доплера (ΔF_d) и задержке огибающей ($\Delta \tau$), соответственно, до 20 Гц и 0.5 Тчипа. Это дает эквивалентное расширение диапазона работы на **2-4** дБ по параметру C / N_0 при фиксированном значении вероятности захвата на сопровождение $P_{lock} \geq 0.6$.

Для сигналов с модуляцией ВОС(1,1) (L1OCp) применение адаптивной схемы повышает вероятность захвата не менее чем на **30%** при снижении параметра C/N_0 до 21 дБ-Гц и $|\Delta F_d| \leq 10$ Гц.

3. Предложенный вариант *некогерентной* СС за РНП обеспечивает с вероятностью 0.9 захват на сопровождение сигналов с ОСШ от **23** дБ-Гц при $T=1$ мс, расстройке по частоте Доплера $|\Delta F_d| \leq 333$ Гц, по задержке $|\Delta \tau| \leq 0.5$ Тчипа и по скорости изменения частоты Доплера $|\Delta \dot{F}_d| \leq 15$ Гц/сек.

Достоверность полученных результатов и синтезированных алгоритмов слежения за РНП подтверждена результатами комплексного математического моделирования и результатами экспериментальных исследований.

Публикации и апробация работы. Основные положения и выводы диссертационного исследования обсуждались на совместных семинарах кафедры радиотехнических систем и НИИ радиотехнических систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники; результаты докладывались на научно-техническом семинаре кафедры РТС «Национального исследовательского университета «МЭИ»; на научных и научно-технических конференциях: XI Международную научно-практическую конференцию «Электронные средства и системы управления» (2015), г. Томск; XVIII Конференция молодых ученых «Навигация и управление движением» (XVIII КМУ 2016), г. Санкт-Петербург; Всероссийская научно-техническая конференция "Научная сессия ТУСУР" (НС ТУСУР 2016), г.Томск; XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (2016), г. Санкт-Петербург; VIII Всероссийская научно-техническую конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (Российские космические системы) 2016, г. Москва; IX Всероссийская научно-техническую конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (Российские космические системы) 2018, г. Москва

По теме диссертации опубликовано 7 работ: 3 статьи в журналах из перечня ВАК (2 переведены на английский язык), 1 в сборнике докладов международной конференций, 3 в сборниках докладов всероссийских конференций. 4 работы содержатся в изданиях, индексированных в базе данных Scopus.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении НИР по проекту ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы», соглашение № 14.574.21.0101 (уникальный идентификатор RFMEFI57414X0101), что подтверждается актом внедрения (приведен в Приложении А1). Так же результаты внедрены в учебный процесс на кафедре РТС ТУСУР и оформлены в виде лабораторной работы по курсу «Системы глобального позиционирования GPS» специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы», профиль «Радиоэлектронные системы космических комплексов». Акт внедрения приведён в Приложении А2.

Личный вклад автора. Постановка решённых в диссертации задач была сделана научным руководителем аспиранта д.т.н. проф. Тисленко В.И., который указал основные направления исследования и принимал участие в обсуждении результатов. Доказательство и обоснование полученных в диссертации результатов, математические выкладки, создание программных комплексов для проведения имитационного моделирования, имитационное моделирование и экспериментальные исследования выполнены лично автором. Соавторы по опубликованным работам оказали помощь в организации натурных экспериментов и интерпретации полученных результатов. Результаты статистического моделирования *когерентного* режима работы схемы слежения за РНП, обрабатывающей сигналы с выхода корреляторов в *нелинейном* фильтре, представлены в работах автора [1, 7]. Результаты работы схемы слежения с применением адаптации по неизвестным начальным параметрам изложены в работах [2, 8, 9]. В публикациях [3] представлены результаты моделирования и экспериментальное применение *некогерентной* схемы слежения на основе *нелинейного* фильтра оценки РНП.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, списка сокращений, списка литературы и одного приложения. Общий объем работы составляет 192 страницы, 110 рисунков. Список литературы включает 111 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задача работы, приведены сведения о научной новизне, практической значимости и определены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлены результаты обзора литературы по теме оценивания радионавигационных параметров обрабатываемых сигналов в навигационном приёмнике. Выделены основные способы организации схем слежения за радионавигационными параметрами. Приведены результаты анализа условий функционирования приёмников САН для КА на ГСО и ВЭО. Также рассмотрены ключевые моменты байесовской теории оценивания, приведено описание современных алгоритмов нелинейного оценивания. Установлено, что в условиях функционирования САН КА на ГСО и ВЭО в качестве схем слежения за РНП необходимо использовать структуры, содержащие динамические следящие фильтры (фильтры Калмана) – «первого» и «второго» типа. Перспективным видится применение схемы слежения за РНП, обрабатывающей сигналы с выходов корреляторов в *нелинейном* фильтре Калмана (*«correlation based Kalman filter tracking loop»/ СС «второго типа»*).

Во **второй главе** описан способ построения схемы слежения за РНП «второго типа». Исследованы переходные процессы в замкнутом контуре слежения по СКП оценок РНП для широкого диапазона значений ОСШ и начального рассогласования по оцениваемым параметрам для СС с *нелинейным* фильтром Калмана. Методом прямого вероятностного моделирования на ЭВМ работы СС «второго типа» получены статистические характеристики для оценок РНП и вероятностные характеристики событий «захват на сопровождение» и «срыв сле-

жения».

В разделе 2.1 представлено описание схемы слежения за РНП, полученной в результате одноэтапной процедуры синтеза (Рис. 1).

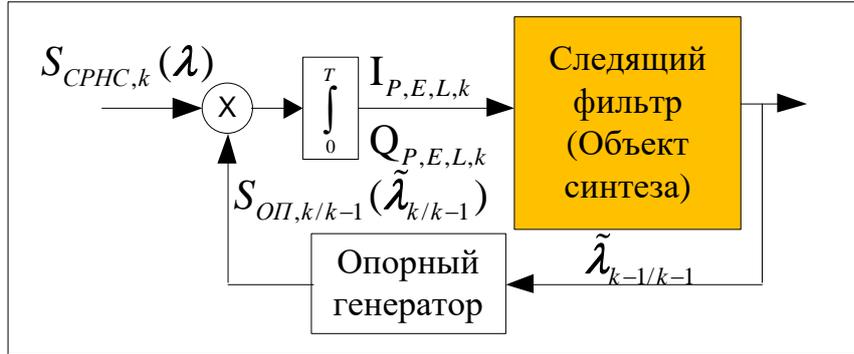


Рис. 1. Структурная схема когерентной СС за РНП «второго типа» («*correlation based Kalman filter tracking loop*»)

Определена математическая модель: введён вектор состояний (ВС) системы $\lambda \square \mathbf{x}$ (1) [4] и определен вектор дискретных наблюдений \mathbf{z}_k (2).

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 \equiv \dot{\varphi}(t) = 2\pi f_D(t) \\ \dot{x}_2 \equiv \dot{f}_D(t) = v(t) \\ \dot{x}_3 \equiv \dot{v}(t) = n_v(t) \\ \dot{x}_4 \equiv \dot{q}(t) = n_q(t) \\ \dot{x}_5 \equiv \dot{\tau}(t) = -\frac{f_D(t)}{f_0} \end{array} \right. , \quad (1)$$

где φ - начальная фаза принимаемого сигнала, f_D - доплеровский сдвиг частоты, $v(t)$ - скорость изменения частоты Доплера, q - ОСШ в дБ-Гц, τ - задержка принимаемого сигнала СРНС, $n_v(t)$ - БГШ по $v(t)$ с нулевым средним и спектральной плотностью мощности (СПМ) S_{n_v} , этот шум учитывает случайные составляющие вариаций РНП, обусловленных, в частности, взаимным движением КА - НКА; $n_q(t)$ – БГШ по $\dot{q}(t)$ с нулевым средним и СПМ S_{n_q} , определяющий модель изменения параметра. Отметим, что вектор начальных условий $\mathbf{x}(0)$ для уравнений (1) **Ошибка! Источник ссылки не найден.** рассматривается как случайный гауссовский вектор, статистические свойства которого определены заданием вектора математического ожидания $\mathbf{E}[\mathbf{x}(0)]$ и ковариационной матрицы $\mathbf{P}_{x,0}$.

В качестве наблюдений выступают отчёты корреляционных интегралов (раннего (E)/точного (P)/ позднего (L)) [1]

$$\mathbf{I}_{E/P/L,k} = \bar{\mathbf{I}}_{E/P/L,k}(\varepsilon_{\tau,k}, \varepsilon_{f_D,k}, \varepsilon_{\varphi_0,k}, q_k) + \tilde{\mathbf{I}}_{E/P/L,k} \quad (2)$$

$$\mathbf{Q}_{E/P/L,k} = \bar{\mathbf{Q}}_{E/P/L,k}(\varepsilon_{\tau,k}, \varepsilon_{f_D,k}, \varepsilon_{\varphi_0,k}, q_k) + \tilde{\mathbf{Q}}_{E/P/L,k},$$

где $\bar{I}(\cdot), \bar{Q}(\cdot)$ регулярные (средние) значения квадратур, \tilde{I}_k, \tilde{Q}_k - флуктуационные компоненты, распределённые по нормальному закону распределения $N(0, \mathbf{K}_{\tilde{I}\tilde{Q}})$, $\varepsilon_{\tau,k} = \tau_k - \tilde{\tau}_k$ - рассогласование по задержке между параметром τ_k входного сигнала и $\tilde{\tau}_k$ сигнала УГЦС; $\varepsilon_{f_{Д,k}} = f_{Д,k} - \tilde{f}_{Д,k}$ - рассогласование по частоте Доплера; $\varepsilon_{\varphi_{0,k}} = \varphi_{0,k} - \tilde{\varphi}_{0,k}$ - рассогласование по начальной фазе. При этом в качестве значений РНП $\{\tilde{\varphi}_{0,k}, \tilde{f}_{Д,k}, \tilde{\tau}_k\}^T$ опорного сигнала УЦГС выступают экстраполированные на текущий момент k оценки ВС $\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}$ с предыдущего момента времени [1]. Таким образом, выражения для средних значений квадратур $\bar{I}(\cdot), \bar{Q}(\cdot)$ являются нелинейными функциями, зависящими от текущих значений РНП \mathbf{x}_k и от экстраполированных на текущий момент k оценок ВС $\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}$ с предыдущего момента времени. То есть в схеме присутствует обратная связь. Данный факт существенно влияет на устойчивость работы алгоритма слежения «второго типа».

Представлен вид типовых дискриминаторов по фазе, частоте и задержке, применяющихся в схеме слежения с линейным фильтром Калмана [1]. При этом в качестве ВС для СС данного типа выступает $\mathbf{x} = \{\varphi \quad f_{Д} \quad \dot{f}_{Д} \quad \tau\}^T$, а параметр q считается известным на всём интервале оценивания.

В разделе 2.2 определены условия проведения статистического моделирования и представлены полученные результаты. При моделировании основными предположениями являются: а) декодирование навигационного сообщения; б) блок поиска сигналов способен формировать начальные оценки РНП при всех исследуемых величинах ОСШ. На (Рис. 2) приведены зависимости СКП оценок РНП и вероятности события «захват на сопровождение» от ОСШ. Так же приведена зависимость предельных значений СКП оценок РНП при нелинейных наблюдениях и аддитивных гауссовых шумах. Видно, что величина СКП оценок РНП при ОСШ $q < 23$ дБ-Гц у СС с *нелинейными* сигма-точечными фильтрами меньше, чем СКП оценок схемы с дискриминаторами и линейным фильтром Калмана. Показано, что при известном навигационном сообщении СС «второго типа» способны осуществлять захват на сопровождение с вероятностью $P_{lock} = 0.8$ при ОСШ $q \geq 23$ дБ-Гц.

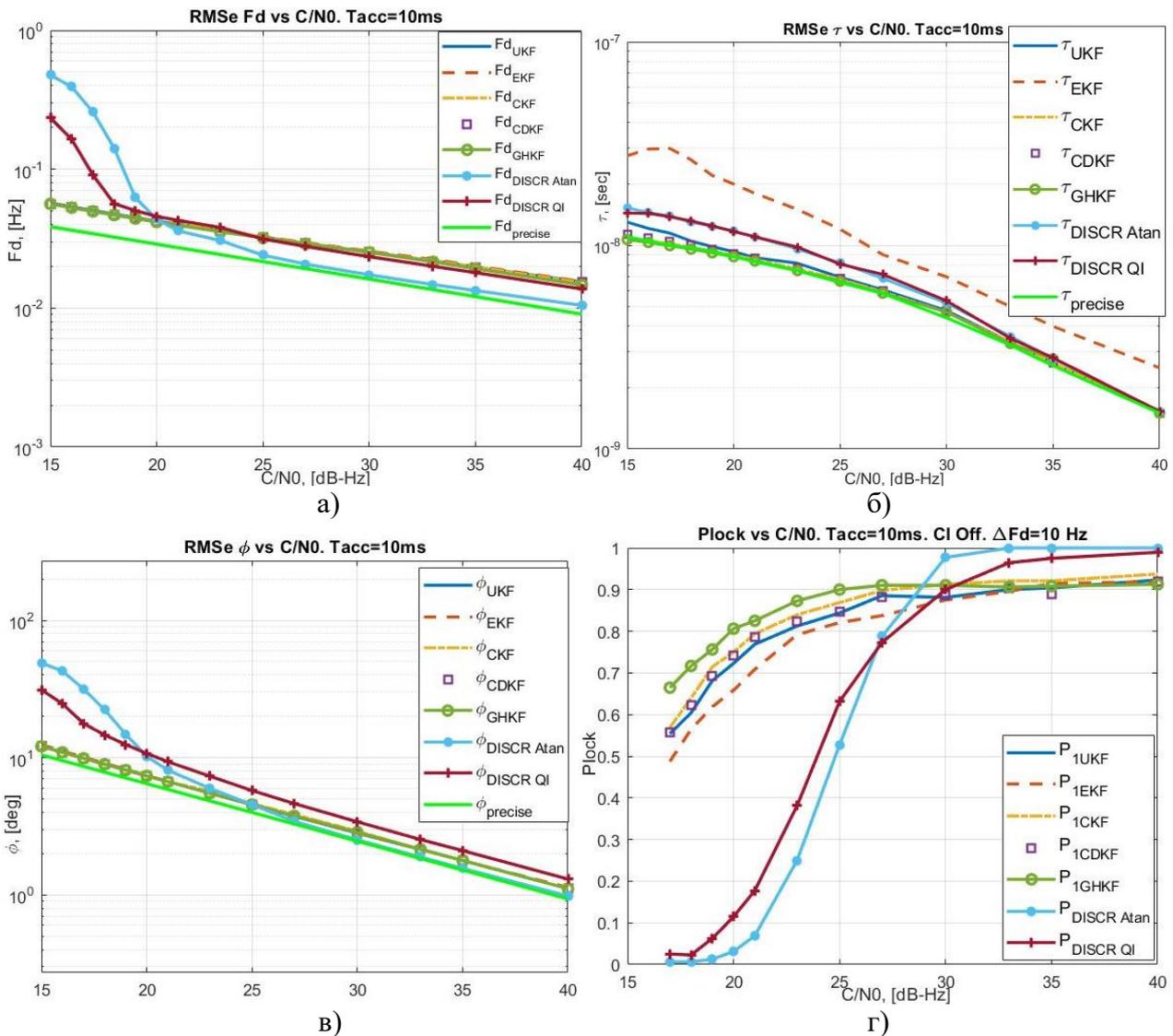


Рис. 2 Зависимость СКП оценок РНП (а-в) и вероятности захвата на сопровождение (г) от C/N_0 для двух разных архитектур организации СС при $T = 10$ мс: а) \hat{f}_d ; б) $\hat{\tau}$; в) $\hat{\phi}$; г) P_{lock} .

В разделе 2.3 приведены способы учёта неизвестного навигационного сообщения для СС «второго типа». А также приведены результаты расчёта характеристик P_{lock} для различных значений времени когерентного накопления T и начальной неопределённости по частоте ΔF_D в случае, когда декодирование цифровой информации (ЦИ) необходимо осуществлять совместно с оценкой РНП (Рис. 3). Качество работы двух типов следящих схем (с дискриминаторами и без дискриминаторов РНП) при наличии неизвестных символов навигационного сообщения по критерию величины P_{lock} зависит от начального

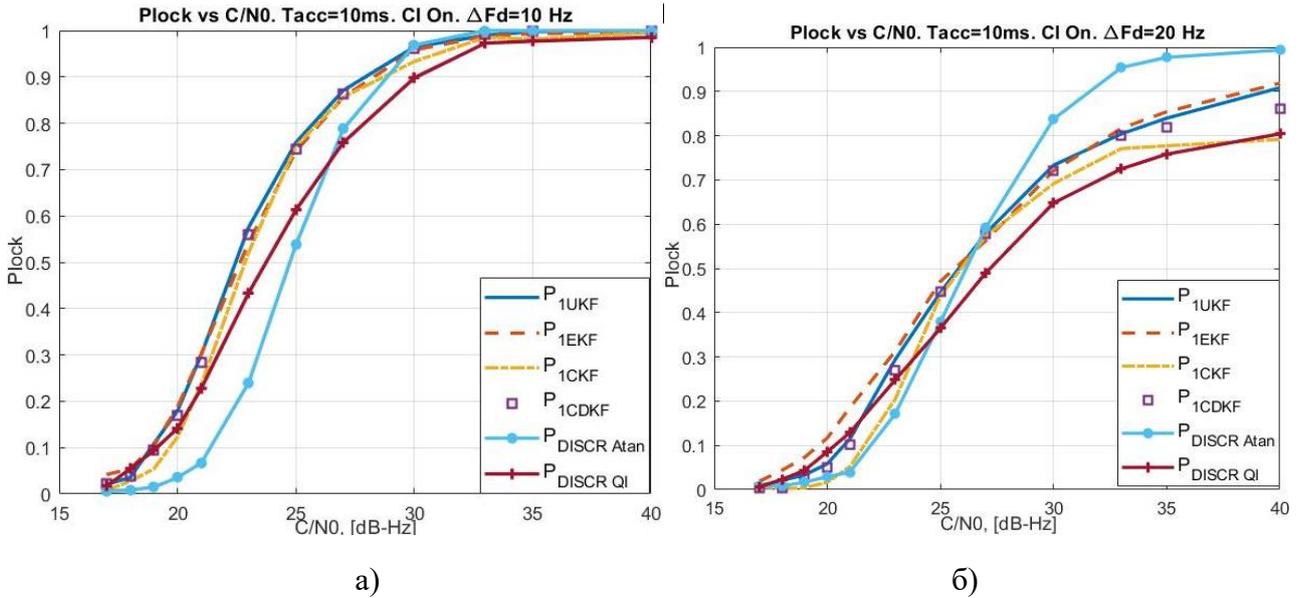


Рис. 3 Вероятность захвата на сопровождение при неизвестном бите ЦИ и $T = 10$ мс для: а) $|\Delta F_D| \leq 10$ Гц Гц; б) $|\Delta F_D| \leq 20$ Гц Гц.

рассогласования по частоте и от времени накопления T . При $P_{lock} \geq 0.6$ отличия по ОСШ для двух типов СС составляет 1–1.5 дБ при времени накопления $T \leq 10$ мс и в зависимости от величины ΔF_D .

В разделе показано, что при увеличении времени накопления до 20мс величина P_{lock} вероятности захвата на сопровождение резко снижается в схеме слежения за РНП «второго типа» даже при высоких ОСШ $q \geq 30$ дБ-Гц. Этот факт может быть объяснен наличием обратной связи. В момент времени, когда СС находится в переходном режиме и не вошла в режим слежения, значения параметров опорного сигнала не совпадают с истинными значениями РНП. Увеличение шага экстраполяции T приводит к увеличению ошибок при вычислении разностей $\varepsilon_{\tau,k} = \tau_k - \tilde{\tau}_k$, $\varepsilon_{f_{D,k}} = f_{D,k} - \tilde{f}_{D,k}$, $\varepsilon_{\varphi_{0,k}} = \varphi_{0,k} - \tilde{\varphi}_{0,k}$. Это в свою очередь приводит к снижению уровня квадратур \mathbf{I}_k , \mathbf{Q}_k и к дальнейшему накоплению ошибок слежения. Увеличение начальной ошибки оценки частоты ΔF_D также ведёт к резкому ухудшению работы СС «второго типа» по критерию P_{lock} . Наиболее явно этот факт проявляется при значениях $T \geq 10$ мс.

В разделе 2.4 поставлена задача расширения диапазона применимости СС «второго типа». Для решения поставленной задачи был предложен адаптивный по неизвестным начальным параметрам вариант построения СС с *нелинейным* фильтром оценки РНП (Рис. 4). Данный способ позволяет повысить величину вероятности P_{lock} для СС на основе *нелинейного* фильтра Калмана. В основе данной структуры лежит многоальтернативный подход формирования оценок ВС при неизвестных параметрах \mathcal{S} системы [7]. Весь диапазон неизвестных параметров \mathcal{S} разбивается на несколько «ячеек» со своим значением параметра \mathcal{S}_i . После чего в каждом из выделенных сегментов происходит фильтрация ВС, а полученные оценки $\hat{\mathbf{x}}_k^i$ суммируются с весовыми коэффициентами, равными

апостериорным вероятностям $P(\mathcal{G}_i / \mathbf{Z}_k)$ неизвестного параметра \mathcal{G}_i :

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \sum_{i=1}^M \hat{\mathbf{x}}_k^i \cdot P(\mathcal{G}_i / \mathbf{Z}_k), \quad (3)$$

где \mathbf{Z}_k – все наблюдения до момента времени k . Веса рассчитываются в соответствии с рекурсивным соотношением [7]

$$P(\mathcal{G}_i / \mathbf{Z}_k) \equiv g_k^i = \frac{g_{k-1}^i \cdot W(\mathbf{z}_k / \mathbf{Z}_{k-1}, \mathcal{G}_i)}{\sum_{i=1}^M g_{k-1}^i \cdot W(\mathbf{z}_k / \mathbf{Z}_{k-1}, \mathcal{G}_i)}, \quad (4)$$

где g_{k-1}^i – априорная вероятность попадания \mathcal{G} в i -ую «ячейку»; \mathbf{z}_k – наблюдения в k -ый момент; $W(\mathbf{z}_k / \mathbf{Z}_{k-1}, \mathcal{G}_i)$ – правдоподобие наблюдений при заданном значении \mathcal{G}_i .

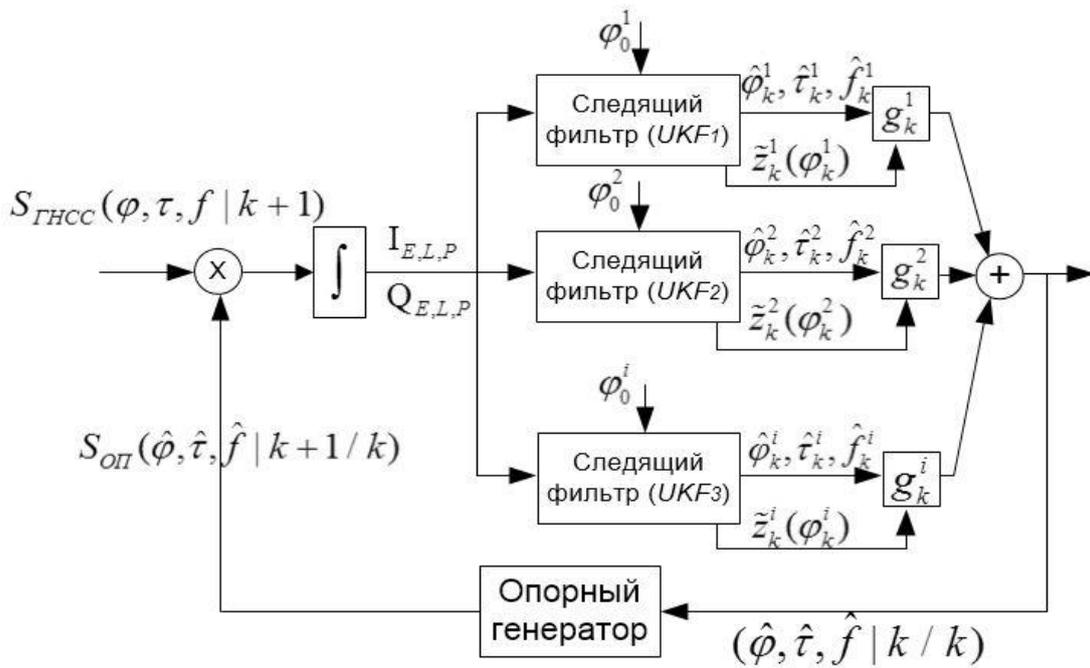


Рис. 4 Структурная схема адаптивной по начальной фазе СС «второго типа» за РНП.

Результаты математического моделирования показывают (Рис. 5) эффективность применения предложенной адаптивной схемы слежения. Данная архитектура повышает вероятность захвата на сопровождение P_{lock} до **30%** при фиксированном ОСШ или, что эквивалентно, при заданном значении P_{lock} уменьшению необходимой для захвата на сопровождение мощности сигнала на **2-4** дБ.

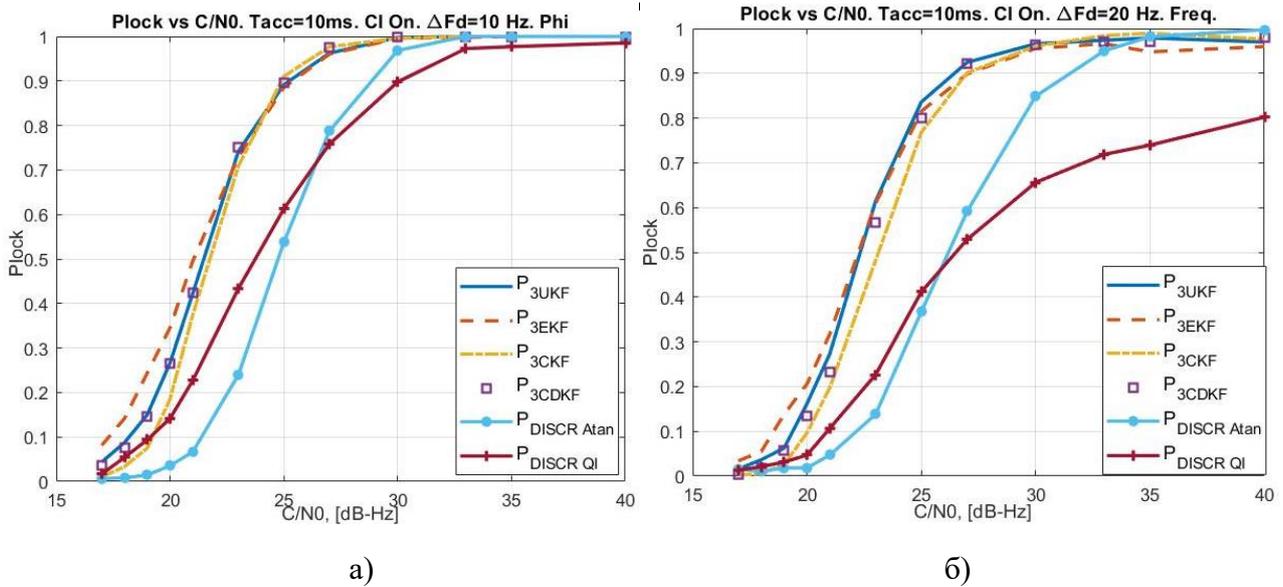


Рис. 5 Вероятность захвата на сопровождение в адаптивной архитектуре СС за РНП «второго типа» с тремя каналами при неизвестном бите ЦИ и $T = 10$ мс для: а) $|\Delta F_D| \leq 10$ Гц; б) $|\Delta F_D| \leq 20$ Гц.

Несомненно, недостатком предлагаемого способа построения СС является увеличение вычислительной нагрузки в M раз, где M – число парциальных каналов. Так как только в одной из M «ячеек» находится истинное значение \mathcal{J} , то после нахождения истинных значений РНП оставшиеся $M-1$ канала исключаются из обработки. Применение одного дополнительного канала положительно сказывается на характеристиках СС. В диссертации рассматриваются варианты с $M=3$ парциальными каналами. Время совместной работы всех параллельных каналов составляет 2 сек, после чего остаётся единственный канал с наибольшей апостериорной вероятностью $P(\mathcal{J}_i / \mathbf{Z}_k)$.

В разделе 2.5 продемонстрирована возможность применения схемы слежения, состоящей из корреляторов и *нелинейного* фильтра, для формирования оценок навигационных параметров перспективных сигналов ГЛОНАСС с модуляцией $BOC(1,1)$ (*pilot*-компоненты). Показано, что при использовании многоальтернативного подхода вероятность попадания в главный максимум временной корреляционной функции (КФ) повышается не менее чем на **30%** при $C/N_0 \geq 21$ дБ-Гц и $|\Delta F_D| \leq 10$ Гц. Иными словами, применение адаптации по неизвестным начальным параметрам способствует частичному разрешению неоднозначности измерения задержки сигналов с модуляцией $BOC(1,1)$. Однако необходимо прибегать к дополнительным техникам для полного разрешения неоднозначности измерений задержки.

В разделе 2.6 выполнено исследование работы СС «второго типа» при снижении ОСШ и влияния наличия нестабильности опорного генератора [4]. При моделировании процесса *нестабильности опорного генератора* модель вариаций частоты определена системой 2-х стохастических дифференциальных уравнений [1]

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_{on}(t) = 2\pi f_{on}(t) + \xi_{\phi} \\ \dot{f}_{on}(t) = \xi_f \end{cases}, \quad (5)$$

где ξ_{ϕ} - БГШ по частоте со спектральной плотностью шума Sf ; ξ_f - БГШ по скорости изменения частоты с СПМ Sg .

Показано, что в случае, когда ЦИ неизвестна и имеется идеальный стабильный опорный генератор, формирование оценок задержки и частоты при слежении за *BPSK* сигналом в СС с *нелинейным* фильтром оценки РНП может поддерживаться до **16** дБ-Гц **без** срывов слежения при $T = 20$ мс. Слежение за фазой сигнала происходит без проскальзывания на полпериода (*cycle slip, перескок фазы*) при $q=17$ дБ-Гц (Рис. 6).

При моделировании нестабильности опорного генератора (5) величины спектральных плотностей фазовых и частотных шумов соответственно были выбраны: $Sf = 0.4e-20$ 1/Гц и $Sg = 1.58e-24$ Гц. ОСШ, при котором могут быть сформированы оценки частоты и задержки в этих условиях, равно **18** дБ-Гц. Также в этом случае проскальзывание фазы в режиме слежения отсутствуют при $q=21$ дБ-Гц для СС с *нелинейным* фильтром Калмана (Рис. 7).

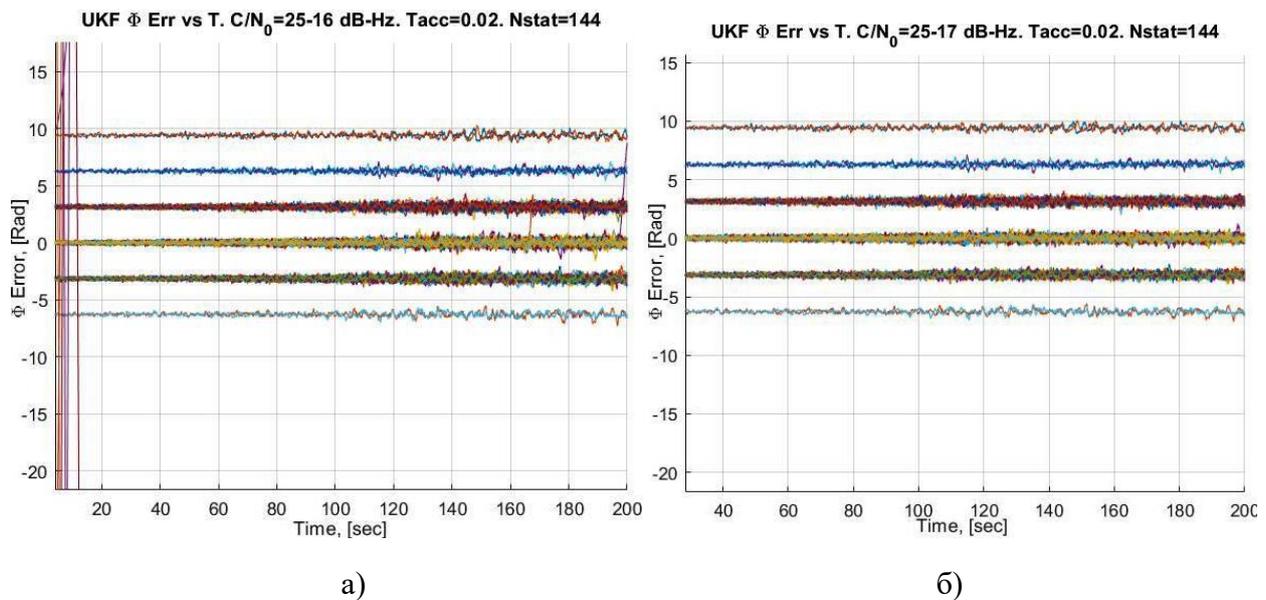


Рис. 6 Ошибки оценки фазы *BPSK* сигналов при идеальном опорном генераторе и снижении ОСШ до: а) 16 дБ-Гц, перескоки фазы присутствуют; б) 17 дБ-Гц, нет перескоков фазы

Показано, что формирование РНП при указанных значениях ОСШ позволяет обеспечить неразрывность навигационного поля при работе по *одной* из СРНС ГЛОНАСС или *GPS*. При этом число радиовидимых НКА, к примеру, для СРНС ГЛОНАСС для КА на ГСО в среднем на интервале восьми суток составляет девять аппаратов, а для КА на ВЭО-80000 в среднем – двенадцать.

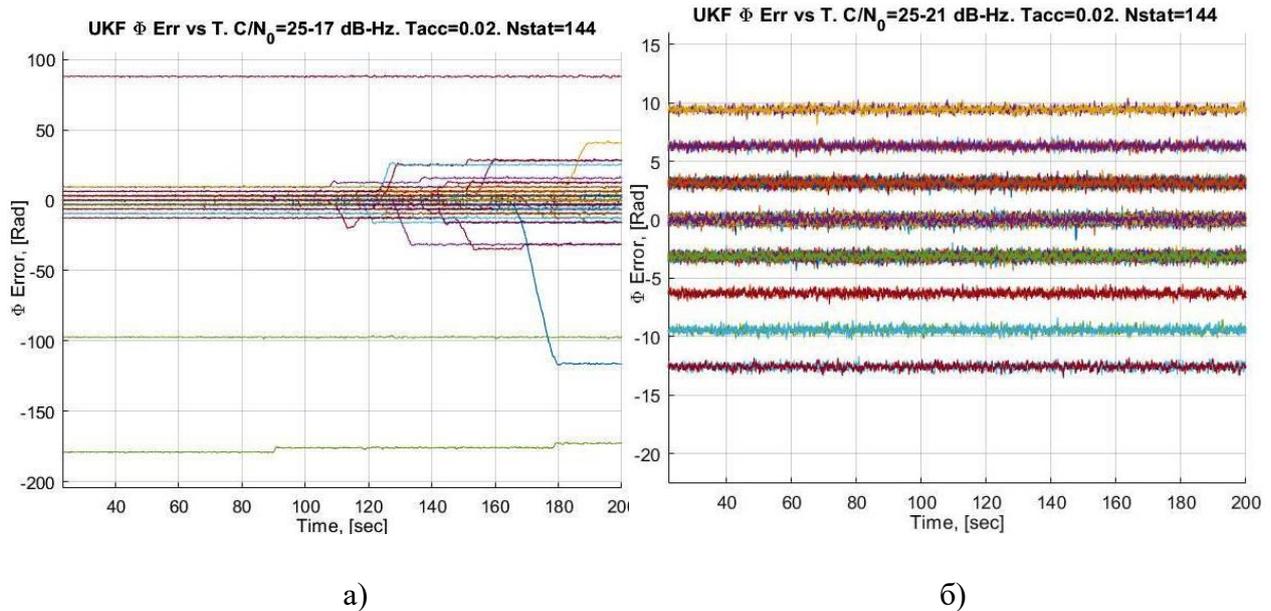


Рис. 7 Ошибки оценки фазы *BPSK* сигналов при *нестабильном* опорном генераторе и снижении ОСШ до: а) 17 дБ-Гц, перескоки фазы присутствуют; б) 21 дБ-Гц, нет перескоков фазы

В разделе также представлены результаты исследования работы СС «второго типа» для формирования оценок РНП перспективных сигналов ГЛОНАСС с модуляцией *BOC(1,1)* при снижении ОСШ. Показано, что формирование оценок частоты и задержки, при слежение за *pilot*-компонентой сигнала ГЛОНАСС *BOC(1,1)* с временем накопления 8 мс (период ПСП) при использовании СС с *нелинейным* фильтром Калмана, может осуществляться при снижении ОСШ до **10** дБ-Гц. Однако при этом *возможно появление перескоков фазы*. Их *отсутствии* наблюдается при снижении ОСШ до **12** дБ-Гц при моделировании опорного генератора с параметрами фазовой и частотной неустойчивости при указанных выше величинах СПМ шумов в (5). При этом полагается, что разрешена неоднозначность измерения задержки *BOC* сигнала, то есть слежение по задержке происходит в главном пике временной КФ.

Третья глава посвящена вопросу применения СС с *нелинейным* фильтром Калмана для получения некогерентных оценок РНП. Рассмотрены несколько вариантов построения некогерентной СС без применения типовых дискриминаторов. Получены точностные характеристики оценок РНП и вероятностные характеристики события «захват на сопровождение» при работе исследуемой архитектуры.

В разделе 3.1 приведена постановка задачи синтеза некогерентной СС, содержащей корреляторы и *нелинейный* фильтр Калмана. Необходимость применения некогерентного режима может быть обусловлена следующими ситуациями: отсутствует битовая синхронизация; произошёл срыв слежения за фазой в СС в когерентном режиме; высокая СКП начальной оценки $\hat{f}_d(0)$, которая возникает при высокой динамике движения потребителя. При этом формирование некогерентных оценок РНП является достаточным, для получения навигационного решения в НАП при условии, что ЦИ была декодирована. По мере уточне-

ния значение РНП в некогерентном режиме слежения, цепи слежения могут быть переведены в когерентный режим работы.

Вектор состояния для некогерентного режима не содержит начальную фазу φ и уравнения состояния в непрерывной форме имеют вид

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) \equiv \dot{\tau}(t) = -\frac{f_D(t)}{f_0}, \\ \dot{x}_2(t) \equiv \dot{f}_D(t) = v(t), \\ \dot{x}_3(t) \equiv \dot{v}(t) = n_v(t), \\ \dot{x}_4(t) \equiv \dot{q}(t) = n_q(t). \end{cases} \quad (6)$$

В качестве наблюдений \mathbf{z}_k при этом используются модули корреляционных интегралов: $\mathbf{z}_k = \{z_{P,k}, z_{E,k}, z_{L,k}\}$, где $z_{P/E/L,k} = \sqrt{I_{P/E/L,k}^2 + Q_{P/E/L,k}^2}$ (Рис. 8). Кроме трёх типовых корреляторов ($P/E/L$) в главе исследуется влияние использования дополнительных частотно-разнесённых корреляционных каналов – быстрого и медленного (*fast/ slow*). В п. 3.1 приведены статистические свойства дополнительных квадратур.

Известно, что процесс \mathbf{z}_k имеет распределение вероятностей Райса и имеет явно выраженную асимметрию при малых значениях произведения qT . Данный факт ведёт к нарушению гауссовости АПРВ. Задача синтеза алгоритма в некогерентной СС относится к классу задач фильтрации с нелинейными, негауссовскими наблюдениями и неаддитивными возмущениями.

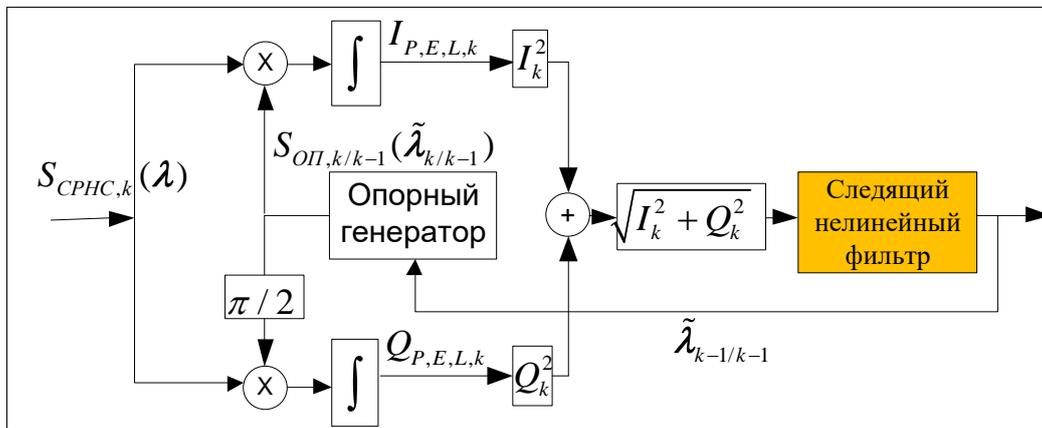


Рис. 8. Структурная схема некогерентной СС «второго типа»

Для использования аппарата фильтрации, рассчитанного на гауссовскую аппроксимацию ПРВ, было предложено заменить наблюдения \mathbf{z}_k статистическим эквивалентом — в виде суммы среднего значения $\bar{\mathbf{z}}_k$ и флуктуационной составляющей $\tilde{\mathbf{z}}_k$:

$$\mathbf{z}_k \approx \bar{\mathbf{z}}_k + \tilde{\mathbf{z}}_k. \quad (7)$$

В этом случае предполагаем, что эквивалентные шумы $\tilde{\mathbf{z}}_k$ распределены по нормальному закону с нулевым средним и ковариационной матрицей $\mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{z}}}$. Для

вычисления среднего значения и дисперсии наблюдений (7) в квазиоптимальном алгоритме фильтрации использованы известные соотношения [8]

$$\bar{z}_{E/L/P,k} = \sigma_{I,Q} \sqrt{\pi/2} \{(1 + e_k^2) I_0(e_k^2/2) + e_k^2 I_1(e_k^2/2)\} \exp(-e_k^2/2), \quad (8)$$

$$\sigma_z^2 = 2\sigma_{I,Q}^2 (1 + e_k^2) - (\bar{z}_{E/L/P,k})^2,$$

где I_0, I_1 – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка.

Подробные результаты статистического моделирования различных *нелинейных* алгоритмов оценки РНП в некогерентной СС «второго типа» представлены в разделе 3.2. К примеру, на (Рис. 9) представлены точностные характеристики оценок РНП в некогерентном режиме при $T = 5$ мс. На (Рис. 10) приведены вероятности захвата на сопровождение при различных условиях.

В работе показано, что некогерентная «*correlation based KF tracking loop*» способна с вероятностью $P_{lock} > 0.8$ осуществить захват на сопровождение сигналов с ОСШ от 21 дБ-Гц при неопределённости по частоте Доплера $|\Delta F_D| \leq 333$ Гц. Увеличение времени когерентного накопления T влияет на точность оценок частоты и задержки. Отметим, что применение дополнительных частотно разнесённых корреляционных каналов (*fast/ slow*) не влияет на точность оценки РНП для СС с *нелинейными* фильтрами.

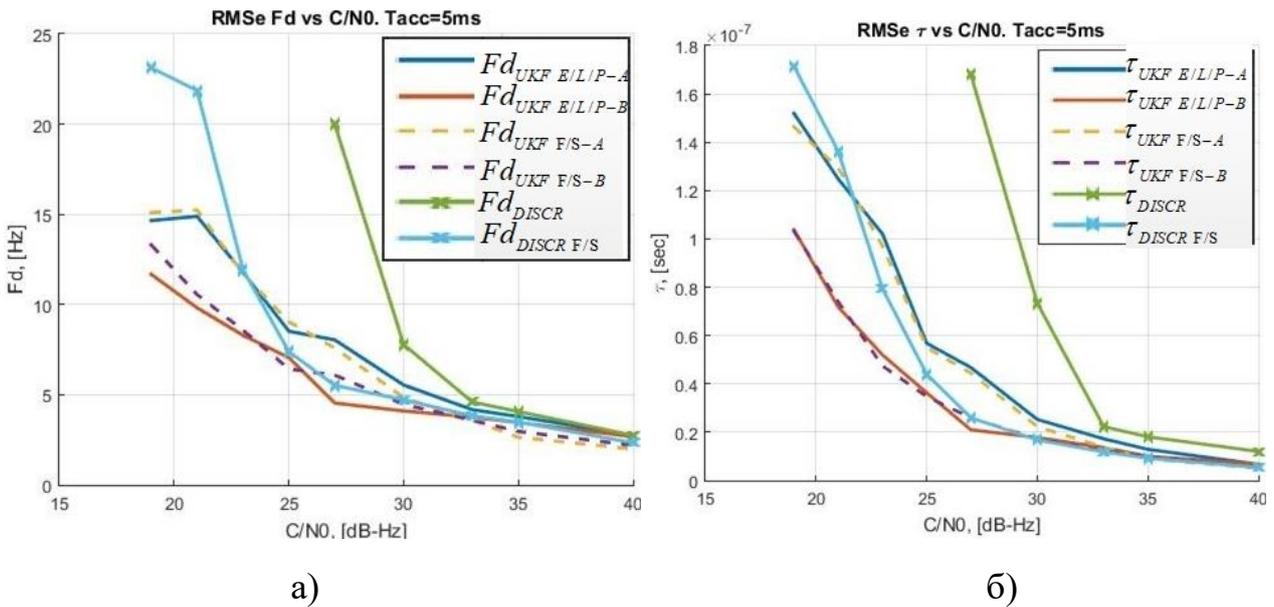


Рис. 9 СКП оценок РНП в некогерентном режиме работы исследуемых архитектур построения СС при $T = 5$ мс для: а) \hat{f}_D ; б) $\hat{\tau}$.

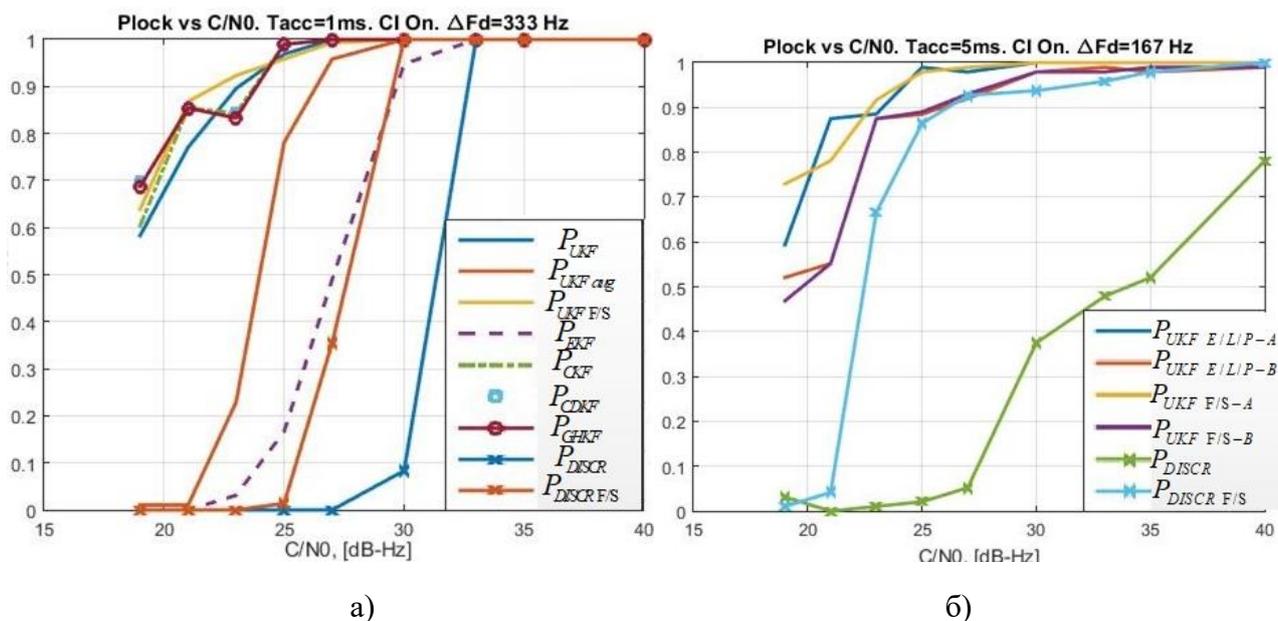


Рис. 10 Вероятность захвата на сопровождение в некогерентном режиме работы исследуемых СС в условиях: а) $T = 1$ мс и $|\Delta F_D| \leq 333$ Гц; б) $T = 5$ мс и $|\Delta F_D| \leq 167$ Гц.

Четвёртая глава посвящена разработке методики экспериментальной проверки предложенных алгоритмов, исследуемых схем слежения и обсуждению результатов. Цель экспериментов состояла в

- 1) подтверждении работоспособности алгоритма слежения «второго типа» по реальным записям цифровых сигналов СРНС;
- 2) сравнительной относительной оценке различий в качестве работы двух типов схем слежения при регистрации процессов формирования оценок РНП по сигналам одного и того же созвездия НКА и общей высокочастотной части приёмного тракта.

С помощью генератора сигналов СРНС (Keysight MXG X-Series N5182B Vector Signals Generator) были сформированы сигналы с параметрами, характерными для условий функционирования САН на ГСО.

В разделе приведены результаты натурных экспериментов, в ходе которых проводилась обработка реальных сигналов СРНС *GPS*. Данные сигналы были записаны в различных типовых условиях функционирования наземной навигационной аппаратуры. Запись сформированных сигналов на промежуточной частоте была осуществлена с помощью одночастотного *GPS/Galileo* навигационного приемника *SiGe GN3S Sampler v3*. Обработка записанных сигналов осуществлена в программном блоке приемника *SiGe GN3S Sampler v3*, реализованного на *Matlab*.

Следует особо отметить, что именно при такой постановке экспериментов, все внешние погрешности, обусловленные влиянием тропосферы, ионосферы, а так же инструментальные погрешности высокочастотной части приёмника (до АЦП) были тождественными, включая шумовую составляющую.

Экспериментальная проверка показала работоспособность всех предлагаемых вариантов реализации следящих систем с *нелинейным* фильтром оценки

РНП (*адаптивный по начальным параметрам* вариант алгоритма СС и некогерентная СС «второго типа»). На (Рис. 11,а) представлены реализации процесса слежения за частотой при захвате на сопровождение для СС «первого типа» и СС «второго типа» с адаптацией по фазе. На (Рис. 11,б) продемонстрирован захват на сопровождение по частоте в *некогерентном* режиме работы СС «второго типа».

Также показана возможность применения исследуемой СС в условиях пониженного ОСШ, характерного для функционирования САН КА на ГСО и ВЭО. На (Рис. 12,а) приведена оценка параметра \hat{q} при снижении мощности сигнала на выходе генератора. На (Рис. 12,б) показаны оценки частоты, формируемые СС обоих типов при снижении ОСШ. Установлено, что данный тип СС способен формировать оценки РНП в условиях кратковременного пропадания сигнала.

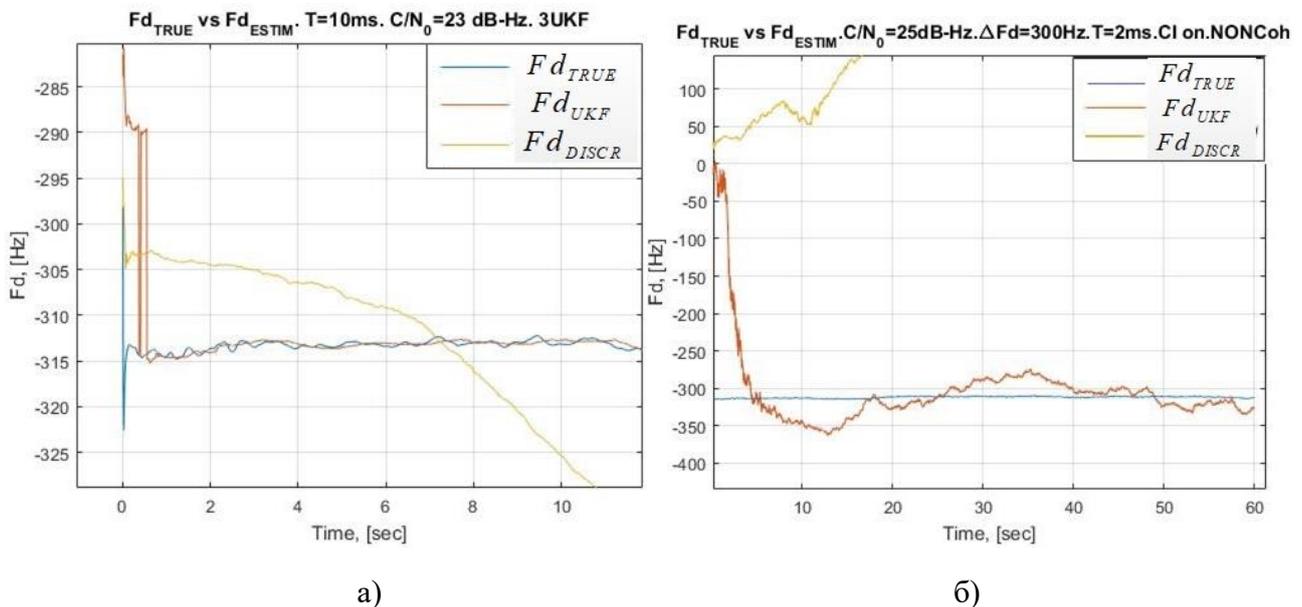


Рис. 11 Результат обработки экспериментальных данных: Захват на сопровождение по частоте СС «второго типа»: а) адаптивная схема с 3 парциальными каналами в когерентном режиме, $\Delta F_D = 20$ Гц, $q \approx 23$ дБ-Гц ; б) *некогерентный* режим при $\Delta F_D = 300$ Гц, $q \approx 25$ дБ-Гц.

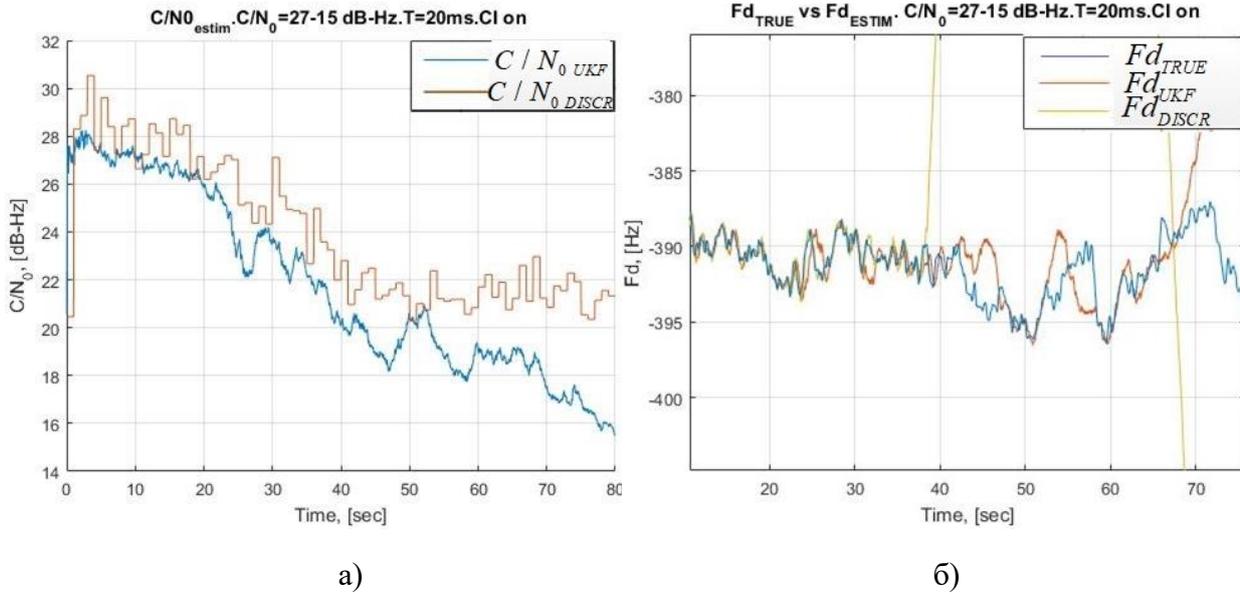


Рис. 12 Результат обработки экспериментальных данных: Слежение за частотой в когерентном режиме при снижении ОСШ и $T = 20$ мс: а) оценка C/N_0 ; б) оценка \hat{f}_D .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) Проведено моделирование навигационного поля, принимаемого системой автономной навигации космического аппарата, находящегося на ГСО и ВЭО. В ходе исследования условий функционирования САН установлено: для КА на ГСО в **80%** времени наблюдения для СРНС ГЛОНАСС и в **70%** для *GPS* отношение сигнал/шум (ОСШ) в принимаемых сигналах не превышает 30 дБ-Гц; для КА на ВЭО с высотой апогея 80000 км в **70%** времени моделирования ОСШ не превышает 30 дБ-Гц для СРНС ГЛОНАСС и *GPS*. Для исследуемых типов орбит параметры \dot{f}_D изменяется в диапазоне ± 15 Гц/с, что соответствует малодинамичному потребителю.

2) В работе была подробно исследована архитектура следящего контура, обрабатывающая в *нелинейном* фильтре Калмана непосредственно выходы корреляторов (схема слежения «второго типа»/ «*correlation based KF tracking loop*»). Выполнено исследование статистических характеристик оценок РНП и вероятностных характеристик событий «захват на сопровождение» (P_{lock}) и «срыв слежения» (P_{loss}) в следящей системе «второго типа», формирующей *совместные* оценки вектора состояния $\mathbf{x} = \{\varphi \quad f_D \quad \dot{f}_D \quad q \quad \tau\}^T$.

Выполнено сравнение характеристик точности слежения с соответствующими параметрами в следящей системе «первого типа», состоящей из типовых дискриминаторов РНП (фазового, частотного и временного) и *линейного* фильтра Калмана.

Показано, что в когерентном режиме при $T=10$ мс точность оценок РНП, формируемых в следящем контуре с дискриминаторами и *линейным* фильтром Калмана, уступает по точности оценок РНП, формируемым схемой слежения

«второго типа» с обработкой сигналов корреляторов в *нелинейном* фильтре, в интервале значений параметра q от **15** до **23** дБ-Гц.

Показано, что при известном знаке ЦИ и $T = 20$ мс СС «второго типа» обеспечивает устойчивый режим слежения до ОСШ в **10** дБ-Гц.

При неизвестном знаке ЦИ, $T = 20$ мс и стабильном опорном генераторе слежение за частотой и задержкой может быть осуществлено при снижении ОСШ до **16** дБ-Гц при наличии перескоков по фазе (*cycle slip*) и до **17** дБ-Гц без фазовых перескоков. При моделировании частотной нестабильности опорного генератора схема слежения за РНП «второго типа», может формировать оценки параметров при $q = 17$ дБ-Гц, $T = 20$ мс и наличии фазовых перескоков. В этих условиях *cycle slips* отсутствуют при $q = 21$ дБ-Гц.

Формирование РНП при ОСШ $q = 21$ дБ-Гц позволяет обеспечить неразрывность навигационного поля при работе по *одной* из СРНС ГЛОНАСС или *GPS*. При этом число радиовидимых НКА на интервале восьми суток для КА на ГСО в среднем составляет: для СРНС ГЛОНАСС – 9 аппаратов, для *GPS* – 13; для КА на ВЭО – 80000: СРНС ГЛОНАСС и *GPS* – по 12 аппаратов.

3) Алгоритм слежения, использующий *нелинейный* фильтр Калмана для обработки корреляционных отсчётов, был применён для слежения за перспективными сигналами СРНС ГЛОНАСС с модуляцией *BOC(1,1)* (*pilot*-компоненты сигналов).

Показано, что при накоплении на длительности одного периода ПСП дальномерного кода $T = 8$ мс, схема оценки РНП «второго типа» способна функционировать при снижении ОСШ до **10** дБ-Гц. Из-за многомодальности временной КФ при использовании «*correlation based KF*» СС высока вероятность попадания оценок по задержке сигнала в локальный корреляционный максимум. Что существенно влияет на работу контура слежения и приводит к неверным оценкам задержки сигнала. Для разрешения неоднозначности временных измерений необходимо применять вспомогательные техники. Данный вопрос подлежит дальнейшему исследованию.

4) Синтезирована схема построения «*correlation based KF tracking loop*» с адаптацией по неизвестным начальным параметрам. Применение следящей схемы с многоальтернативным подходом позволяет значительно повысить P_{lock} для архитектуры с *нелинейным* фильтром оценки РНП. При адаптации по фазе и фиксированном значении q вероятность P_{lock} повышается на **10-20%** или при фиксированной вероятности захвата на сопровождение P_{lock} позволяет расширить диапазон работы СС ОСШ на **2-4** дБ. При начальном рассогласовании по частоте $|\Delta F_d| \leq 20$ Гц бóльший прирост по характеристикам вероятности захвата (до **30%**) достигается за счёт применения адаптации по частоте.

При слежении за *pilot*-компонентами перспективных сигналов ГЛОНАСС с модуляцией *BOC(1,1)*, применение подхода с адаптацией по фазе позволяет повысить вероятности P_{lock} – попадания в глобальном максимуме по задержке на **30%** при $C / N_0 \geq 21$ дБ-Гц.

5) Синтезирован некогерентный следящий контур с применением *нелинейных* фильтров Калмана. Данная структура построения схемы слежения может быть применена для уточнения первичных оценок РНП при ОСШ меньших 30 дБ-Гц, а так же в случае отсутствия битовой синхронизации (при некогерентном накоплении огибающих корреляционных интегралов, полученных на 1мс когерентного накопления). Также некогерентная СС с когерентным накоплением на интервала $T > 2$ мс может быть использована, к примеру, после потери слежения за фазой в когерентном режиме слежения, но при наличии достаточно точных оценок частоты.

Показано, что в этом случае схема может осуществить захват на сопровождение с $P_{lock} \geq 0.7$ при $T = 1$ мс $|\Delta F_D| \leq 333$ Гц, $|\Delta \tau| \leq 0.5 T_{chip}$, $|\Delta \dot{f}_D| \leq 15$ Гц/с и $C/N_0 \geq 20$ дБ-Гц. Так же показано, что некогерентный режим работы СС с *нелинейным* фильтром способен формировать оценки задержки при ОСШ в 16 дБ-Гц с СКП 70 нс и СКП по частоте 13 Гц.

б) Выполнен сравнительный анализ алгоритмов оценивания РНП в «*correlation based KF tracking loop*» с применением современных алгоритмов нелинейной фильтрации. В частности рассматривались следующие нелинейные фильтры: расширенный фильтр Калмана (*EKF*); сигма-точечный фильтр Калмана на основе *unscented*-преобразования (*UKF*); сигма-точечный фильтр Калмана на основе *unscented*-преобразования с расширением вектора состояния шумами наблюдений (*augmented UKF*); сигма-точечный фильтр Калмана на основе интерполяционной формулы Стирлинга (*CDKF*); сигма-точечный фильтр Калмана на основе кубатурного правила вычисления интегралов (*CKF*); сигма-точечный фильтр Калмана, основанный на вычислении интегралов с помощью квадратур Гаусса-Эрмита (*GHKF*).

Показано, что в когерентном режиме работы СС все нелинейные алгоритмы оценивания демонстрируют схожие точности. Исключением является расширенный фильтр Калмана, оценки задержки распространения сигнала СРНС $\hat{\tau}$ в котором ухудшаются с увеличением T . Наибольшими вычислительными затратами при одинаковой точности оценок РНП обладает *GHKF*. При этом данный алгоритм обладает наилучшей вероятностью захвата на сопровождение. Установлено, что при одинаковой точности оценок РНП кубатурный фильтр (*CKF*) обладает наилучшей вероятностью P_{lock} .

В качестве рекомендации для проектирования «*correlation based KF tracking loop*» в когерентном режиме предлагается использовать либо *CDKF*, либо *UKF* с коэффициентом $\alpha = 0.7$, так как эти алгоритмы обладают оптимальными точностными и вероятностными характеристиками.

Установлено, что в некогерентном режиме работы СС с применением в качестве *нелинейного* фильтра алгоритма расширенного фильтра Калмана, качество оценок РНП значительно уступает оценкам сигма-точечных фильтров. В некогерентном режиме работы «*correlation based KF tracking loop*» так же рекомендуется использовать сигма-точечные фильтры *CDKF*, либо *UKF* с коэффициентом $\alpha = 0.7$.

7) Представлены результаты экспериментальных исследований, подтвер-

ждающие данные математического моделирования на ЭВМ. При проведении экспериментов в лабораторных условиях с помощью генератора сигналов СРНС были смоделированы условия, характерные для работы системы САН КА на геостационарных и высокоэллиптических орбитах. Также проведены эксперименты, демонстрирующие работу СС «второго типа» в условиях временного пропадания сигналов СРНС в сложных условиях функционирования навигационной аппаратуры.

Список цитируемой литературы

1. ГЛОНАСС принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
2. Petovello M.G., O'Driscoll C., Lachapelle G. Carrier Phase Tracking of Weak Signals Using Different Receiver Architectures / Department of Geomatics Engineering, Alberta: The University of Calgary, Canada, 2008. - 11p.
3. Харисов В.Н., Горев А.П. Исследования одноэтапного алгоритма навигационно-временных определений для приемника СРНС// Радиотехника. Радиосистемы, 2001, №4, с. 49—58.
4. Psiaki M.L., Jung H. Extended Kalman Filter Methods for Tracking Weak GPS Signals / ION GPS, Portland, USA. 2002. pp. 2539 – 2553.
5. Ziedan N. I., Garrison J. L. Bit Synchronization and Doppler Frequency Removal at Very Low Carrier to Noise Ratio Using a Combination of the Viterbi Algorithm with an Extended Kalman Filter / ION GPS/GNSS, Portland, USA. 2003. 12p.
6. Sarkka S. Bayesian Filtering and Smoothing. Cambridge University Press. 2013. 254 p.
7. Lainiotis D.G. Partitioning: A Unifying Framework for Adaptive Systems, I: Estimation / Proceedings of the IEEE Vol 64, №. 8, Aug 1976. – pp 1126 – 1140.
8. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь. 1986. 512 с.

Публикации по теме диссертации

Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК

1. **Шаврин В.В.**, Филимонов В.А., Лебедев В.Ю., Тисленко В.И., Кравец А.П., Конаков А.С. Квазиоптимальная оценка параметров сигналов ГНСС в режиме когерентного приёма с использованием алгоритма сигма-точечного фильтра Калмана / Гироскопия и навигация. 2016, № 3 (94). сс. 26-37.
Shavrin V.V., Tislenko V.I., Lebedev V.Y., Konakov A.S., Filimonov V.A., Kravets A.P. Quasioptimal estimation of gnss signal parameters in coherent reception mode using sigma-point kalman filter // Gyroscopy and navigation. 2017. № 1 (8). pp. 24-30. - **SCOPUS**
2. **Шаврин В.В.**, Филимонов В.А., Лебедев В.Ю., Тисленко В.И. Оценка радионавигационных параметров сигналов ГНСС в режиме когерентного адаптивного приёма с использованием алгоритма сигма-точечного фильтра Калмана // Научно-технический журнал Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. Т. 3, № 4. с 16 – 21.
3. **Шаврин В.В.**, Филимонов В.А., Лебедев В.Ю., Тисленко В.И., Конаков А.С. Сигма-точечный алгоритм фильтра Калмана в задаче оценки параметров

сигналов ГНСС в некогерентном режиме слежения в аппаратуре автономной навигации космических аппаратов // Гироскопия и навигация. 2018, № 3 (102). сс. 23-39.

Shavrin V.V., Tislenko V.I., Lebedev V.Y., Konakov A.S., Filimonov V.A., Sigma-Point Kalman Filter Algorithm in the Problem of GNSS Signal Parameters Estimation in Non-Coherent Tracking Mode in Spacecraft Autonomous Navigation Equipment // Gyroscopy and navigation. 2018. № 4 (9). pp. 255-266. - **SCOPUS**

Научно-технические отчёты

4. Отчёты по ОКР «Разработка принципов построение и элементов системы автономной навигации с применением отечественной специализированной элементной базы на основе наногетероструктурной технологии для космических аппаратов всех типов орбит» в рамках 218 постановления правительства РФ. Исполнитель - ФГБОУ ВО ТУСУР. Руководитель проекта от ТУСУР - Ю.А. Шиняков. Заказчик — ОАО «ИСС», 2013 г., 2014 г., 2015 г.

5. Отчёты по теме «Создание перспективных программных прототипов, аппаратно-программного комплекса и компонентов ГНСС-приёмников нового поколения на основе собственного арсенид-галлиевого производства для повышения автономности функционирования компонент Национальной информационной спутниковой системы» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы». Исполнитель - ФГБОУ ВО ТУСУР. Руководитель проекта от ТУСУР - Ю.А. Шиняков. 2014 г., 2015 г., 2016 г.

Публикации в журналах, входящих в базу данных SCOPUS

6. Filimonov V.A., **Shavrin V.V.**, Tislenko V.I., Kravets A.P., Lebedev V.Yu., Shkolniy V.N. Coordinate and time-frequency support of a spacecraft flight by means of autonomic navigation using sigma-point Kalman filter algorithm / Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Математика и физика. 2015. Т. 8. № 4. С. 385-393.

Публикации в сборниках всероссийских и международных конференций

7. **Шаврин В.В.**, Филимонов В.А., Тисленко В.И., Кравец А.П., Конаков А.С. Задача совместной оценки радионавигационных Параметров и энергетического параметра сигнала СРНС в когерентном режиме. // Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск). – 2016: – Ч. 1.– С. 65–68.

8. **Shavrin V.V.**, Tislenko V.I., Filimonov V.A., Kravets A.P., Konakov A.S. Analyzing a joint adaptive algorithm in coherent mode for filtering radio-navigation parameters of gnss signals in an autonomous space navigation system // 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems - Saint Petersburg. - 2016 - pp 527 - 531. - **SCOPUS**

9. **Шаврин В.В.**, Филимонов В.А., Тисленко В.И., Кравец А.П., Конаков А.С. Адаптивный Алгоритм Совместной Когерентной Фильтрации Параметров Сигнала В Системе Автономной Космической Навигации // Материалы XVIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», 2016 г.

Список сокращений

- АПРВ – апостериорная плотность вероятности;
 БГШ – белый гауссовский шум;
 ВС – вектор состояния;
 ВЭО – высокоэллиптическая орбита;
 ГЛОНАСС – Глобальная навигационная спутниковая система, РФ;
 ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система;
 ГСО – геостационарная орбита;
 КА – космический аппарат;
 ЛФК – линейный фильтр Калмана;
 НАП – навигационная аппаратура потребителя;
 НКА – навигационный космический аппарат;
 ОСШ – отношение мощности сигнала к спектральной мощности шума в полосе 1 Гц;
 ПРВ – плотность распределения вероятности;
 ПСП – псевдослучайная последовательность;
 ПЧ – промежуточная частота;
 РНП – радионавигационные параметры;
 САН – система автономной навигации;
 СРНС – спутниковая радионавигационная система;
 СС – следящая система;
 СКП – среднеквадратическая погрешность;
 СПМ – спектральная плотность мощности;
 УЦГС – управляемый цифровой генератор сигнала;
 ЦИ – цифровая информация;
 ВОС – англ. binary offset carrier – бинарная модуляция на поднесущих;
 ВРСК – англ. Binary Phase-Shift Keying – бинарная фазовая модуляция;
 CDKF – англ. central difference Kalman filter – сигма-точечный фильтр Калмана на основе формул интерполяции Стирлинга;
 СКФ – англ. cubature Kalman filter – сигма-точечный фильтр Калмана на основе кубатурного правила вычисления многомерных интегралов;
 Е – англ. early – ранняя квадратура;
 ЕKF – англ. extended Kalman filter – расширенный фильтр Калмана (на основе разложения нелинейной функции в ряд Тейлора в точке оценки);
 F – англ. Fast – быстрая квадратура;
 Galileo – англ. Galileo positioning system – глобальная система позиционирования, ЕС;
 ГНКФ – англ. Gauss-Hermite Kalman filter – сигма-точечный фильтр Калмана с применением квадратур Гаусса-Эрмита для вычисления многомерных интегралов;
 GPS (NAVSTAR GPS) – англ. Global Positioning System – глобальная система позиционирования, США;
 KF – англ. Kalman filter – фильтр Калмана;

L – англ. late – поздняя квадратура;

P – англ. Prompt - точная квадратура;

S – англ. Slow – медленная квадратура;

SPKF - англ. sigma-point Kalman Filter – сигма-точечный фильтр Калмана (семейство фильтров в которых используются сигма-точки);

UKF – англ. unscented Kalman filter – сигма-точечный фильтр Калмана с применением unscented - преобразования;

UT – англ. unscented transformation – unscented преобразование;

vE – англ. very early – очень ранняя квадратура;

vL – англ. very late – очень поздняя квадратура.