



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Рачицкая Антонина Павловна

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА
РАДИОСИГНАЛОВ ПРИ КОНТРОЛЕ
ЦЕЛОСТНОСТИ НАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯ
ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ
СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ**

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: Цикин Игорь Анатольевич
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Чесноков Михаил Николаевич
доктор технических наук, профессор,
главный специалист Акционерного общества
«Конструкторское бюро «Луч»

Авдеев Владимир Алексеевич
кандидат технических наук, доцент,
заместитель начальника кафедры космической радиолокации и
радионавигации Федерального государственного бюджетного
военного образовательного учреждения высшего
профессионального образования «Военно-космическая академия
имени А.Ф.Можайского»

Ведущая организация: Акционерное общество
«Российский институт радионавигации и времени»

Защита состоится 21 декабря 2021 года в 16:00 ч на заседании диссертационного совета У.05.12.04 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, 2-й учебный корпус, аудитория 347.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте университета www.spbstu.ru.

Автореферат разослан « » ноября 2021 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Коротков Александр Станиславович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Радиосигналы навигационных космических аппаратов (НКА) глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) применяются для решения таких научно-практических задач, как оценка параметров движения навигационных объектов (НО), синхронизация устройств телекоммуникационных систем, ориентация НО в пространстве и т.п. Указанные задачи решаются на основе обработки радиосигналов, принятых одновременно от нескольких НКА ГНСС и образующих радионавигационное поле в точке нахождения НО. Нарушения различного характера могут приводить к существенным ошибкам в работе аппаратуры НО, превышение которыми некоторого допустимого уровня (например, уровня нормальных ошибок, обусловленных тепловым шумом приемной аппаратуры НО) интерпретируется как *нарушение целостности навигационного поля (НП)*. Подобные нарушения могут быть обусловлены воздействием как мультипликативных (внутрисистемные нарушения, влияние среды распространения радиосигнала и т.п.), так и аддитивных помех, в том числе структурных, подобных по форме сигналам рассматриваемой ГНСС («легитимным» сигналам). Такие помехи, генерируемые источниками группы навигационных сигналов (ИГНС), могут приводить к значительным ошибкам в определении параметров НО.

Известны два принципиально разных подхода к обработке сигналов ГНСС в условиях возможного наличия структурных помех. *Первый подход* предполагает ослабление (тем или иным способом) влияния структурной помехи на аппаратуру навигационного объекта [В.С. Ефименко, В.Н. Харисов, Ö.С. Dabak, S. Daneshmand, A. Broumandan и др.]. Однако при достаточно высоком уровне воздействующей помехи ошибки измерения параметров НО (местоположения, углов пространственной ориентации и т.д.) могут оказаться недопустимо большими, причем подобный факт нарушения целостности НП окажется неизвестным для пользователя. *Второй подход*, предполагающий лишь идентификацию наличия нарушения, или *контроль целостности навигационного поля (КЦНП)*, обеспечивает оповещение пользователя о тех случаях, когда результатам навигационных измерений доверять нельзя.

Основные известные методы оповещения пользователя о недопустимо высоком уровне ошибок измерений [R. T. Ioannides, T. Walter, P. Closas, J. R. Van der Merwe, Z. Zhang, S. Hewitson, Р. Ю. Зимин, К. К. Веремеенко, В. О. Сурков, А. В. Иванов, Д. В. Комраков и др.] рассчитаны на специфику нарушений внутрисистемного характера и не могут обеспечить достаточную эффективность в условиях наличия структурных помех. В то же время для таких нарушений задача КЦНП может быть решена на основе пространственно-временной обработки сигналов, реализуемой с использованием приемных антенных решеток (АР). Такой *пеленгационный* метод позволяет учесть вероятные отличия направлений на источники как «легитимных» навигационных сигналов (НКА ГНСС), так и структурных помех (ИГНС). Известно [M. L. Psiaki, P. Y. Montgomery, F. Rothmaier, А. В. Никитин] использование эвристических форм такого подхода, когда решение принимается на основе постобработки результатов *пеленгационных измерений*. В то же время, в условиях ограничений на размеры навигационного объекта, когда возможно использовать лишь малое (2-6) число антенных элементов, достижимые вероятностные характеристики (ВХ) системы КЦНП оказываются недопустимо низкими.

С другой стороны, для нарушений, модель которых описывается воздействием ИГНС, можно ожидать улучшения ВХ системы КЦНП при использовании оптимальных методов, основанных на статистической теории принятия решений, когда решающая статистика для правила принятия решения (далее - алгоритма) вычисляется через построение функций правдоподобия (ФП) и отношения правдоподобия (ОП) для реализаций анализируемых процессов непосредственно на элементах АР [H. L. Van Trees, А. И. Перов]. При этом если какие-либо «мешающие» параметры ФП оказываются *a priori* неизвестными, то их исключение может быть произведено в соответствии с обобщенным критерием отношения правдоподобия (ООП)

[H.L.Van Trees]. Необходимость такого подхода может оказаться тем более обоснованной, когда используются АР с малым числом элементов. Последнее является особенно актуальным, например, в случае реализации процедуры КЦНП на малогабаритных беспилотных летательных аппаратах.

Реализация оптимальных алгоритмов обработки сигналов обычно требует высоких вычислительных затрат, в связи с чем актуальным является рассмотрение различных *подоптимальных* решений с целью повышения эффективности, т.е. поиска компромисса между достижимыми ВХ и вычислительной сложностью в условиях использования АР с малым числом элементов. Соответствующие алгоритмы (как оптимальные, так и подоптимальные), в которых решение о наличии или отсутствии нарушения целостности НП принимается непосредственно в ходе первичной обработки анализируемых процессов на элементах АР без привлечения результатов каких-либо промежуточных измерений, принято называть «прямыми» («*direct*») [C.Closasy, J.Cheng, P.Closas]. Как правило, такие прямые алгоритмы оказываются значительно сложнее, чем соответствующие упрощенные алгоритмы, когда решение принимается на основе вторичной обработки («постобработки») результатов промежуточных измерений (напр., измеренных разностей фаз сигналов на различных антенных элементах, измеренных угловых направлений на источники навигационных сигналов и т.п.). Однако ВХ алгоритмов постобработки могут оказаться неудовлетворительными, в особенности если рассматривать эвристические формы таких алгоритмов [M.L.Psiaki, P.Y.Montgomery]. Улучшения ВХ алгоритмов постобработки при сохранении невысокой вычислительной сложности можно было бы достичь, применяя методы статистической теории принятия решений в отношении использования промежуточных результатов измерений (далее – «оптимальные алгоритмы постобработки»).

Экспериментальное исследование эффективности алгоритмов КЦНП требует наличия специальных имитаторов группы навигационных сигналов (ИГНС), способных в условиях натурального (или полунатурного) эксперимента симитировать работу ИГНС. Существующие имитаторы (напр., Labsat, Navis, Spirent и др.) отличаются высокой ценой, обеспечивают ограниченный набор режимов работы и, кроме того, выпускаются, в основном, зарубежными производителями, в силу чего не всегда могут оказаться доступными для использования. Кроме этого, необходимыми являются также исследования влияния характеристик имитатора на степень его соответствия рассматриваемой модели ИГНС.

Цель и задачи работы

Объектом исследования являются алгоритмы обработки навигационных радиосигналов при контроле целостности навигационного поля ГНСС в условиях воздействия структурных помех при использовании антенных решеток с малым числом элементов.

Предметом исследования является эффективность процедуры КЦНП, определяемая вероятностью пропуска нарушения целостности навигационного поля, а также вычислительными и аппаратными затратами на реализацию алгоритма КЦНП.

С учетом изложенного, **целью данной работы** является повышение эффективности контроля целостности навигационного поля ГНСС на основе совершенствования алгоритмов обработки навигационных радиосигналов при использовании антенных решеток с малым числом элементов

Достижение поставленной цели требует решения следующих **задач**:

1. Синтез оптимальных, в соответствии с обобщенным критерием отношения правдоподобия, и поиск соответствующих подоптимальных алгоритмов КЦНП при прямой обработке процессов, наблюдаемых на элементах АР.
2. Синтез оптимальных и подоптимальных алгоритмов КЦНП при постобработке результатов пеленгационных измерений.

3. Моделирование и совместный анализ вероятностных характеристик и вычислительной сложности исследуемых алгоритмов КЦНП.
4. Разработка программно-аппаратного устройства имитации группы навигационных сигналов и проведение полунатурного моделирования исследуемых алгоритмов КЦНП с использованием записей реальных сигналов созвездий НКА современных ГНСС.

Научная новизна работы

1. Осуществлен синтез оптимального, по критерию ООП, алгоритма КЦНП и разработаны соответствующие ему подоптимальные алгоритмы при прямой обработке процессов, наблюдаемых на элементах АР.
2. Произведена оптимизация алгоритмов КЦНП при постобработке результатов пеленгационных измерений.
3. Проведен сравнительный анализ исследуемых алгоритмов КЦНП одновременно по их ВХ и вычислительной сложности с учетом их реализации на современной программируемой элементной базе.
4. Произведена оценка степени достоверности полученных в работе вероятностных характеристик исследуемых алгоритмов КЦНП путем их сравнения с результатами проведенного в работе полунатурного моделирования с использованием записей реальных сигналов созвездий НКА современных ГНСС.

Теоретическая ценность проведенного исследования

1. Получены аналитические зависимости для оценки вероятностных характеристик и вычислительной сложности синтезированных алгоритмов КЦНП.
2. Оценена степень соответствия результатов, получаемых на идеализированной Matlab модели, тем результатам, которые следует ожидать в реальных условиях приема радионавигационных сигналов НКА и ИГНС при использовании реальных радиоприемных устройств;
3. Получены аналитические выражения для описания точности работы ИГНС от параметров его функциональной схемы.

Практическая ценность новых научных результатов

1. Предложен подоптимальный алгоритм КЦНП, обеспечивающий низкие значения вероятности пропуска нарушения при том, что его вычислительная сложность сравнима со сложностью однократной процедуры пеленгования источника навигационных сигналов.
2. Показано, что предложенный подоптимальный алгоритм обеспечивает высокий уровень эффективности даже в условиях использования сигналов 4-х НКА при 2- элементной АР.
3. Определены условия, при которых для реализации процедуры КЦНП может использоваться радиоприемный тракт без компенсации неидентичностей фазовых характеристик каналов, а также определены условия, когда такая компенсация является необходимой.

Методология диссертационного исследования

В ходе проведенных исследований использовались следующие методы и подходы:

1. Синтез оптимальных и подоптимальных алгоритмов КЦНП производился с использованием метода статистического синтеза алгоритмов принятия решения.
2. Выбор порога принятия решения производился в соответствии с критерием Неймана-Пирсона.
3. Избавление от мешающих параметров в алгоритме принятия решения осуществлено в соответствии с методом максимума правдоподобия.

4. Измерение вероятностных характеристик алгоритмов КЦНП осуществлялось на основе метода Монте-Карло.
5. Реализация процедур численной оптимизации осуществлялась с использованием методов последовательного поиска и Нелдера-Мида.

Положения, выносимые на защиту

1. Синтез алгоритма КЦНП в соответствии с обобщенным критерием отношения правдоподобия при прямой обработке сигналов с элементов АР обеспечивает снижение вероятности пропуска нарушения на несколько порядков по сравнению с алгоритмами постобработки.
2. Предложенный подоптимальный алгоритм прямой обработки позволяет более, чем на порядок снизить требования к объему вычислительных ресурсов при незначительном (не более, чем в несколько раз) ухудшении вероятностных характеристик.
3. Разработанный программно-аппаратный имитатор группы навигационных сигналов учитывает особенности формирования сигналов реальных ГНСС на современной программируемой элементной базе и обеспечивает точность координатных точек порядка 1 м.
4. Разработанная методика полунатурного моделирования алгоритмов КЦНП, предусматривающая использование записей реальных сигналов ГНСС и сигналов программно-аппаратного имитатора ИГНС, позволяет учесть влияние неидентичности каналов радиоприемной аппаратуры НО.

Степень достоверности полученных результатов

Оптимизация алгоритмов принятия решения осуществлялась с использованием классического обобщенного критерия отношения правдоподобия, позволяющего достичь минимума вероятности пропуска при фиксированной вероятности ложных тревог. Реализация универсальной имитационной модели для исследования алгоритмов КЦНП произведена на основе Matlab пакета прикладных программ для решения технических задач, в том числе задач цифровой обработки сигналов (ЦОС), включая большое число встроенных ЦОС-функций (БПФ, численные максимизации, сортировки, матричные вычисления, формирование выборок случайных величин с заданным распределением, и т.д.), Численная максимизация функций правдоподобия, необходимая для реализации ООП, осуществлялась проверенными методами поиска локальных максимумов (Нелдера-Мида и прямого поиска). Проведенное полунатурное моделирование с учетом реальной обстановки распространения сигналов и реальных характеристик радиоприемного тракта позволило уточнить полученные на идеализированной модели результаты.

Апробация работы

Материалы, представленные в ВНКР, прошли апробацию на **12 конференциях** различных уровней:

1. **2019 г.** Международная конференция «International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies», 11–12 июля, ФГАОУ ВО «СПбПУ», Санкт-Петербург.
2. **2018 г.** Международная конференция «International Conference on Electrical Engineering and Photonics - IEEE EExPolytech-2018», 22-23 октября, ФГАОУ ВО «СПбПУ», Санкт-Петербург.
3. Международная конференция «International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)»:
2018 г. 4-6 июля, Афины, Греция
2016 г. 27–29 июня, Вена, Австрия

4. **2018** г. Международная конференция «25th anniversary Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems», Concern Central Scientific and Research Institute Elektropribor, 28-30 мая, Санкт-Петербург.
5. **2018** г. 20-я международная конференция "Цифровая обработка сигналов и ее применение", 28-30 марта, Москва.
6. Международная конференция «International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking»:
 - 2017** г. 28-30 августа, г. Санкт-Петербург
 - 2016** г. 26-28 сентября, г. Санкт-Петербург
 - 2015** г. 26-28 августа, г. Санкт-Петербург
7. Научно-практическая Конференция с международным участием «Неделя науки», ФГАОУ ВО «СПбПУ»,
 - 2016** г. 14 – 19 ноября, г. Санкт-Петербург
 - 2015** г. 30 ноября - 5 декабря, г. Санкт-Петербург
 - 2014** г. 1 - 5 декабря, г. Санкт-Петербург.

По теме исследования опубликовано **25 работ**, в том числе **6 статей** в рецензируемых отечественных журналах, входящих в перечень **ВАК РФ**, **8 работ** – в сборниках материалов международных конференций, входящих в перечень **Scopus**, **11 работ** – в сборниках материалов отечественных конференций (**РИНЦ**). При этом все основные результаты проведенного исследования, отраженные в приведенных публикациях, получены лично автором диссертации.

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы использовались в ООО «Специальный технологический центр» (ООО «СТЦ») при создании программно-аппаратного комплекса контроля целостности навигационного поля (имеется соответствующий Акт внедрения результатов диссертационной работы).

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из **Введения, пяти глав, Заключения, списка сокращений, списка обозначений, списка литературы и Приложения**. Общий объем диссертационной работы составляет 164 страницы, из которых 133 страницы основного текста, 73 рисунка, 5 таблиц, 89 формул, список литературы из 124 наименований и 1 приложения.

Краткое содержание работы

Во **Введении** кратко обоснована актуальность темы исследования, приведены цель и основные задачи работы, сведения о практической и теоретической значимости полученных результатов, а также методах и подходах, используемых в работе. Перечислены новые научные результаты и сведения об их апробации, приведены основные научные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложена структура диссертации.

В **первой главе** приведены сведения об особенностях приема и обработки сигналов ГНСС в условиях воздействия помех различного происхождения. Особое внимание уделено проблеме снижения достоверности проводимых измерений координат пользователей в условиях воздействия структурных помех. Рассмотрены известные методы повышения достоверности измерения координат НО на основе использования средств КЦНП и выявлены их недостатки. Предложен способ улучшения имеющихся результатов на основе применения аппарата статистического синтеза алгоритмов принятия решений. В итоге сформулированы и обоснованы цель и задачи работы.

В рамках **второй главы** произведен синтез прямого оптимального, по критерию ООП, алгоритма КЦНП, рассчитанного на возможное наличие нарушения, обусловленного сигналами ИГНС. При синтезе алгоритма, в соответствии с [H.L.Van Trees] рассмотрены ФП для вектор-столбца $\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_M(t)]^T$ реализаций $x_m(t)$ процессов на каждом m -ом из M антенных элементов АР, расположенной на навигационном объекте с координатами $\mathbf{P}_{НО}$, в условиях наблюдения созвездия, состоящего из L видимых НКА, каждый l -й ($l=1 \dots L$) из которых имеет известные в данный момент времени координаты $\mathbf{P}_{НКА}^{(l)}$, при справедливости каждой из двух гипотез: H_0 (нарушение целостности НП отсутствует) и H_1 (нарушение имеет место). Рассматриваемая задача относится к случаю «сложных гипотез», поэтому произведены соответствующие процедуры максимизации ФП, приводящие к избавлению от мешающих параметров, в качестве которых в первую очередь были рассмотрены следующие: начальные фазы и амплитудные коэффициенты анализируемых сигналов; координаты \mathbf{P}' , и смещение $\Delta\tau'$ шкалы времени ИГНС относительно шкалы времени ГНСС. Полученный в результате такого синтеза оптимальный прямой алгоритм КЦНП (далее – алгоритм A) имеет следующий вид:

$$\max_{\mathbf{P}', \Delta\tau'} \Upsilon_1(\mathbf{P}', \Delta\tau') - \Upsilon_0 \underset{H_0}{>} \underset{H_1}{<} \Lambda_1, \quad (1)$$

$$\text{где } \Upsilon_1(\mathbf{P}', \Delta\tau') = \frac{1}{ME_0 N_0} \sum_{l=1}^L \left\{ \left| \mathbf{V}_l'^T \mathbf{H}_l \right|^2 + \left| \mathbf{V}_l^T \mathbf{H}_l - \sum_{k=1}^L \frac{\mathbf{V}_k'^T \mathbf{H}_l}{ME_0} \mathbf{H}_l^* \mathbf{H}_l R_{lk} \right|^2 \right\}, \quad \Upsilon_0 = \frac{1}{ME_0 N_0} \sum_{l=1}^L \left| \mathbf{V}_l^T \mathbf{H}_l \right|^2,$$

$E_0 = \int_{(T_a)} (s^{(l)}(t))^2 dt$ – энергия сигнала $s^{(l)}(t)$ l -го НКА, $C_0^{(l)}(t)$ – псевдослучайная последовательность, модулирующая сигнал l -го НКА ($l=1 \dots L$), $N_0/2$ – спектральная плотность средней мощности аддитивного белого гауссова шума. Порог принятия решения Λ_1 определяется в соответствии с критерием Неймана–Пирсона. Данный алгоритм предполагает вычисление значений взаимных корреляционных функций (ВКФ)

$$R_{lk} = \int_{(T_a)} C_0^{(l)}(t - \tau_1^{(l)}) C_0^{(k)}(t - \tau_1'^{(k)}) e^{-j\Delta\omega_d^{(l)} t} e^{j\Delta\omega_d'^{(k)} t} dt \quad \text{и векторов корреляционных интегралов}$$

$\mathbf{V}'_l = \left[V'_1{}^{(l)} \quad V'_2{}^{(l)} \quad \dots \quad V'_M{}^{(l)} \right]^T$ и $\mathbf{V}_l = \left[V_1{}^{(l)} \quad V_2{}^{(l)} \quad \dots \quad V_M{}^{(l)} \right]^T$, элементы которых имеют следующий вид:

$$V'_m{}^{(l)} = \int_{(T_a)} F_{xm}(t) C_0^{*(l)}(t - \tau'_1{}^{(l)}) e^{-j\Delta\omega'_d{}^{(l)} t} e^{-j\Delta\omega_0^{(l)} t} dt, \quad (2)$$

$$V_m{}^{(l)} = \int_{(T_a)} F_{xm}(t) C_0^{*(l)}(t - \tau_1{}^{(l)}) e^{-j\Delta\omega_d^{(l)} t} e^{-j\Delta\omega_0^{(l)} t} dt. \quad (3)$$

где $F_{xm}(t)$ – комплексная огибающая реализации $x_m(t)$ процесса на каждом m -м из M элементов АР, координаты которых в локальной системе координат НО равны соответственно $\tilde{\mathbf{P}}_m = [\tilde{x}_m \quad \tilde{y}_m \quad \tilde{z}_m]^T$; $\tau_1{}^{(l)}$ – время распространения сигнала l -го НКА ($l = 1 \dots L$) до опорного ($m = 1$) антенного элемента АР; $\Delta\omega_d^{(l)}$ – доплеровское смещение частоты сигнала l -го НКА; $\tau'_1{}^{(l)}$ ($l = 1 \dots L$) – время распространения l -го сигнала ИГНС до антенного элемента АР, выбранного в качестве опорного (здесь и далее – при $m=1$); $\Delta\omega'_d{}^{(l)}$ ($l = 1 \dots L$) – доплеровское смещение частоты l -го сигнала ИГНС; $\Delta\omega_0^{(l)} = \omega_0^{(l)} - \omega_0$ – отстройка частоты радиосигнала l -го НКА от центральной частоты приема ω_0 . Интегрирование в (2) и (3) производится на интервале анализа, величина T_a которого определяется длительностью модулирующей последовательности $C_0^{(l)}(t)$ сигнала каждого l -го НКА. При этом для вычисления направляющих векторов $\mathbf{H}_H = \left[e^{j\delta\varphi_1} \quad e^{j\delta\varphi_2} \quad \dots \quad e^{j\delta\varphi_M} \right]^T$ и $\mathbf{H}_l = \left[e^{j\delta\varphi_1^{(l)}} \quad e^{j\delta\varphi_2^{(l)}} \quad \dots \quad e^{j\delta\varphi_M^{(l)}} \right]^T$, используемых для взвешенного суммирования в (1), вычисляются разности фаз $\delta\varphi_m^{(l)}$ и $\delta\varphi'_m{}^{(l)}$ ($l = 1 \dots L$) между каждым m -ым ($m = 1 \dots M$) и опорным ($m = 1$) антенными элементами для направлений на НКА и ИГНС соответственно:

$$\delta\varphi_m^{(l)} = \frac{\omega_0^{(l)}}{c} \left[\mathbf{P}_{HO} - \mathbf{P}_{HKA}^{(l)} \right]^T \mathbf{A}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \tilde{\mathbf{P}}_m / \left\| \mathbf{P}_{HO} - \mathbf{P}_{HKA}^{(l)} \right\|, \quad (4)$$

$$\delta\varphi'_m{}^{(l)} = \frac{\omega_0^{(l)}}{c} \left(\mathbf{k}_0^{(H)}(\mu_H, \eta_H) \right)^T \tilde{\mathbf{P}}_m, \quad (5)$$

где $\mathbf{A}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ – матрица поворота локальной системы координат НО относительно геоцентрической [J.A.Cheng, S.Daneshmand]; $\mathbf{k}_0^{(H)}(\mu_H, \eta_H) = \left[x_{k0}^{(H)} \quad y_{k0}^{(H)} \quad z_{k0}^{(H)} \right]^T$; $x_{k0}^{(H)} = \sin \mu_H \cos \eta_H$; $y_{k0}^{(H)} = \cos \mu_H \cos \eta_H$; $z_{k0}^{(H)} = \sin \eta_H$; c – скорость света в вакууме, $\omega_0^{(l)}$ – несущая частота радиосигнала l -го НКА (или l -го сигнала ИГНС); μ_H, η_H – угловые направления на ИГНС. При этом именно в формулах (4) и (5) учитывается *пеленгационный* принцип, заключающийся в сравнении направлений на источники навигационных сигналов, а также единство направления прихода для всех сигналов ИГНС, обуславливающих наличие нарушения целостности НП.

На основе алгоритма A в (1) получены соответствующие алгоритмы (B , C , D и E), учитывающие наличие априорной неопределенности относительно различных параметров НО и ИГНС, причем вид этих алгоритмов аналогичен (1) с тем лишь отличием, что численная максимизация производится по ряду дополнительных неизвестных параметров (рис. 1). На рис. 2 изображена обобщенная структурная схема этих алгоритмов.

Виды априорной неопределённости:

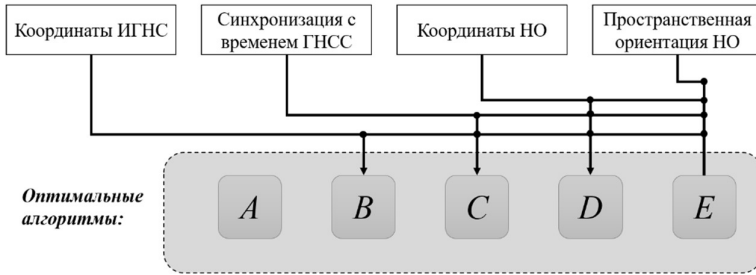


Рис. 1. Классификация синтезированных прямых оптимальных алгоритмов КЦНП по типу учитываемой априорной неопределенности

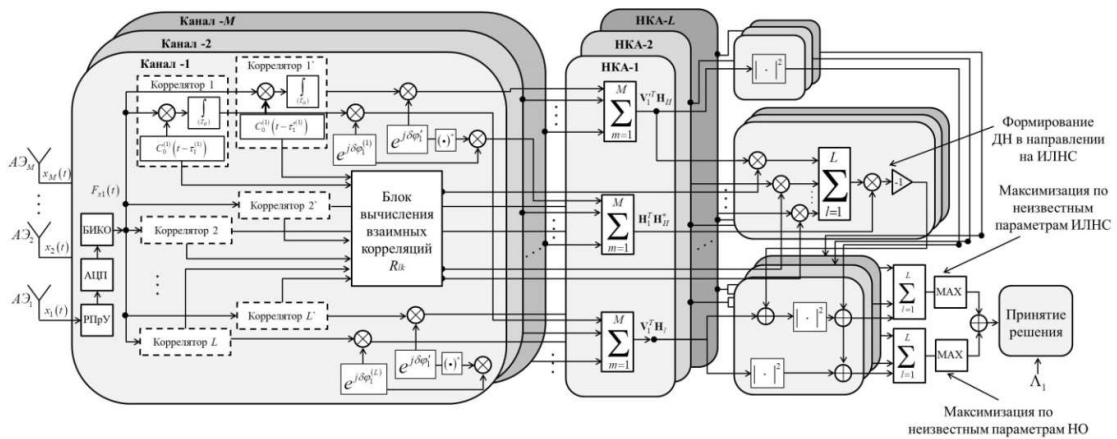


Рис. 2. Обобщенная структурная схема прямых оптимальных алгоритмов КЦНП

Полученные алгоритмы $A \dots E$ отличаются сравнительно высокой вычислительной сложностью, обусловленной необходимостью проведения процедур максимизации по большому количеству неизвестных параметров ($\mathbf{P}_{НО}$, \mathbf{P}' , $\mu_{И}$, $\eta_{И}$, α, β, γ , $\Delta\tau$ и $\Delta\tau'$). В связи с этим рассмотрены различные варианты упрощения алгоритмов $A \dots E$, направленные на снижение вычислительных затрат. Такие формы алгоритмов, обеспечивающие существенное снижение вычислительных затрат без значительных потерь в вероятностных характеристиках (увеличение вероятности пропуска нарушения не более, чем в несколько раз) будем далее называть *подоптимальными*.

Так, для пренебрежимо малого уровня взаимной корреляции сигналов НКА и ИГНС получаем подоптимальные алгоритмы *первой группы* (алгоритмы $A1 \dots E1$). Аналогично, при условии незначительной мощности легитимных сигналов НКА по сравнению с сигналами ИГНС получаем алгоритмы *второй группы* (алгоритмы $A2 \dots E2$). Кроме этого, численная максимизация по неизвестным координатам $\mathbf{P}_{НО}$ может быть заменена максимизацией непосредственно по частотно-временным параметрам $\tau_1^{(l)}, \Delta\omega_d^{(l)}$ для сигнала каждого l -го НКА, а по координатам \mathbf{P}' - непосредственно по частотно-временным параметрам $\tau_1'^{(l)}, \Delta\omega_d'^{(l)}$ для каждого l -го сигнала ИГНС. Применяя такую процедуру упрощения к алгоритмам $A \dots E$, получаем алгоритмы *третьей группы* (алгоритмы $A3 \dots E3$). Дополнительно применяя такой же механизм упрощения, что и при получении алгоритмов третьей группы, к подоптимальным алгоритмам из первой и

второй групп, получаем соответственно *четвертую* (алгоритмы А4...Е4) и *пятую* (алгоритмы А5...Е5) группы.

Структурные схемы реализации полученных подоптимальных алгоритмов аналогичны схеме на рис. 2, за исключением ряда соответствующих структурных элементов. Как будет показано далее в части, относящейся к 4-й главе, примененные упрощения незначительно повлияли на достижимые вероятности пропуска нарушения для полученных алгоритмов. При этом, можно сразу обозначить наиболее простой из всех перечисленных подоптимальных алгоритмов (алгоритм В4), имеющий следующий вид:

$$\frac{1}{ME_0N_0} \max_{\mu_{II}, \eta_{II}} \sum_{l=1}^L \left| \mathbf{V}_l^T(\boldsymbol{\tau}', \Delta\boldsymbol{\omega}'_d) \mathbf{H}_{II}(\mu_{II}, \eta_{II}) \right|^2 \underset{H_0}{>} \underset{H_1}{\tilde{\Lambda}'_2}, \quad (6)$$

где $V_m^{(l)}(\boldsymbol{\tau}', \Delta\boldsymbol{\omega}'_d)$ - определяется в соответствии с формулой (2), $\mathbf{H}_{II} = \begin{bmatrix} e^{j\delta\phi'_1} & e^{j\delta\phi'_2} & \dots & e^{j\delta\phi'_M} \end{bmatrix}^T$ - в соответствии с формулой (5), $\boldsymbol{\tau}'_1 = \begin{bmatrix} \tau_1^{(1)} & \tau_1^{(2)} & \dots & \tau_1^{(L)} \end{bmatrix}$ и $\Delta\boldsymbol{\omega}'_d = \begin{bmatrix} \Delta\omega_d^{(1)} & \Delta\omega_d^{(2)} & \dots & \Delta\omega_d^{(L)} \end{bmatrix}$. Структурная схема данного алгоритма приведена на рис. 3. На данной схеме, как и в алгоритмах на схеме рис.2, для вычисления коэффициентов суммирования в (6) вычисляются разности фаз $\delta\phi'_m$ между каждым m -м и опорным антенными элементами для соответствующего направления на ИГНС, определяемого угловыми направлениями μ_{II}, η_{II} в соответствии с (5).

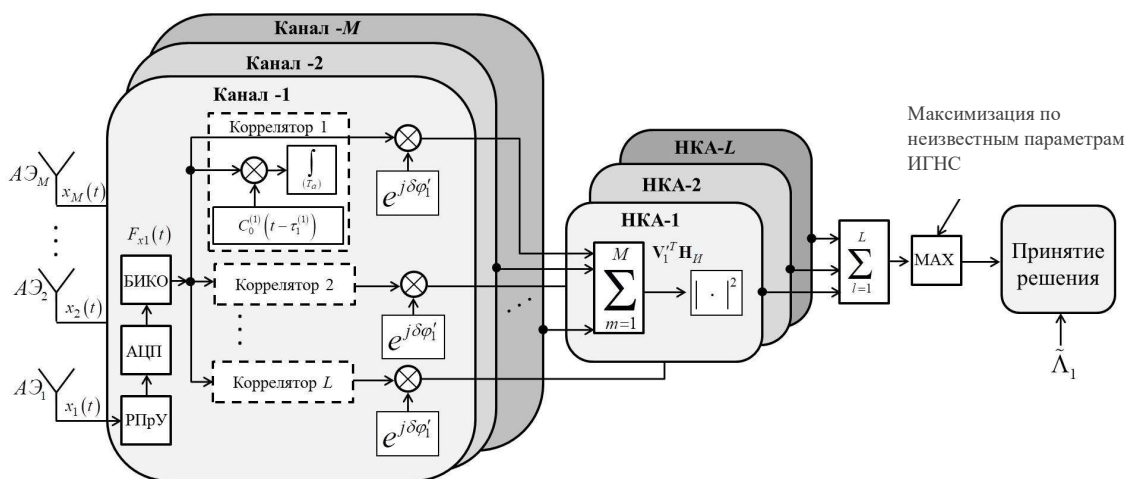


Рис. 3. Структурная схема прямого подоптимального алгоритма В4

Таким образом, в данном подоптимальном алгоритме так же, как и во всех рассмотренных выше, неявно реализуется пеленгационный принцип, учитывающий равенство углов прихода всех навигационных сигналов, излучаемых из одной точки пространства (ИГНС). Поэтому представляет интерес рассмотрение методов КЦНП, основанных на непосредственном измерении именно углов прихода [F.Rothmaier] или соответствующих разностей фаз между сигналами на различных антенных элементах [A.Broumandan] для каждого l -го из L навигационных сигналов. Такие алгоритмы *постобработки пеленгационных измерений* рассматриваются в **третьей главе**. Применительно к пеленгационным измерениям $\mu_{изм}^{(l)}, \eta_{изм}^{(l)}$ источника каждого l -го навигационного сигнала так же, как и при решении первой задачи, был

применен обобщенный критерий ООП и получен оптимальный алгоритм постобработки (алгоритм F):

$$\sum_{l=1}^L \frac{(\mu_{\text{расч}}^{(l)} - \mu_{\text{изм}}^{(l)})^2}{(\sigma_{\mu,l}^{\text{изм}})^2 + (\sigma_{\mu,l}^{\text{расч}})^2} + \sum_{l=1}^L \frac{(\eta_{\text{расч}}^{(l)} - \eta_{\text{изм}}^{(l)})^2}{(\sigma_{\eta,l}^{\text{изм}})^2 + (\sigma_{\eta,l}^{\text{расч}})^2} + \sum_{l=1}^L \left\{ \frac{2}{L} \mu_{\text{изм}}^{(l)} \sum_{l=1}^L \mu_{\text{изм}}^{(l)} - (\mu_{\text{изм}}^{(l)})^2 \right\} / (\sigma_{\mu,l}^{\text{изм}})^2 - \sum_{l=1}^L \frac{1}{L^2} \left(\sum_{l=1}^L \mu_{\text{изм}}^{(l)} \right)^2 / (\sigma_{\mu,l}^{\text{изм}})^2 +$$

$$+ \sum_{l=1}^L \left\{ \frac{2}{L} \eta_{\text{изм}}^{(l)} \sum_{k=1}^L \eta_{\text{изм}}^{(k)} - (\eta_{\text{изм}}^{(l)})^2 \right\} / (\sigma_{\eta,l}^{\text{изм}})^2 - \sum_{l=1}^L \frac{1}{L^2} \left(\sum_{k=1}^L \eta_{\text{изм}}^{(k)} \right)^2 / (\sigma_{\eta,l}^{\text{изм}})^2 \quad \begin{matrix} H_1 \\ > \\ < \\ H_0 \end{matrix} \quad \Lambda_0, \quad (7)$$

где $(\sigma_{\mu,l}^{\text{изм}})^2$ и $(\sigma_{\eta,l}^{\text{изм}})^2$ – дисперсии случайных величин $\mu_{\text{изм}}^{(l)}$ и $\eta_{\text{изм}}^{(l)}$, а $\mu_{\text{расч}}^{(l)}$ и $\eta_{\text{расч}}^{(l)}$ – расчетные углы азимута и склонения для l -го НКА соответственно.

Задача КЦНП на основе постобработки пеленгационных измерений может быть упрощена до случая, когда решение принимается на основе сравнения с порогом непосредственно разностей $\Delta\mu = \mu_{\text{расч}} - \mu_{\text{изм}}$ и $\Delta\eta = \eta_{\text{расч}} - \eta_{\text{изм}}$ измеренных и расчетных угловых направлений. Такие алгоритмы также рассмотрены в третьей главе: *алгоритм F1 одного угла* («Если $\Delta\mu > \Lambda_{\Delta\mu}$, то справедлива гипотезы H_1 , в другом случае – гипотеза H_0 »), *алгоритм F2 «ИЛИ»* («Если $\Delta\mu > \Lambda_{\Delta\mu}$ или $\Delta\eta > \Lambda_{\Delta\eta}$, то принимается решение в пользу гипотезы H_1 , в любом из остальных случаев – в пользу гипотезы H_0 »), *алгоритм F3 «И»* («Если одновременно и $\Delta\mu > \Lambda_{\Delta\mu}$ и $\Delta\eta > \Lambda_{\Delta\eta}$, то принимается решение в пользу гипотезы H_1 , в любом из остальных случаев – в пользу гипотезы H_0 »), где $\Lambda_{\Delta\mu}$ и $\Lambda_{\Delta\eta}$ – пороги принятия решения.

В рамках **четвертой главы** для исследования эффективности всех рассматриваемых в работе алгоритмов КЦНП, было проведено имитационное моделирование и измерены вероятностные характеристики (ВХ) – зависимости вероятности $P_{\text{ПН}}$ пропуска нарушения от отношения γ помеха/сигнал при фиксированном значении вероятности ложной тревоги. Примеры зависимости вероятности $P_{\text{ПН}}$ от γ для различных алгоритмов КЦНП при фиксированных параметрах моделирования, когда $P_{\text{ЛТ}} = 10^{-3}$, $C_0/N_0 = 40 \text{ дБ} \cdot \text{Гц}$, $M = 4$, $L = 3$, приведены на рис. 4.

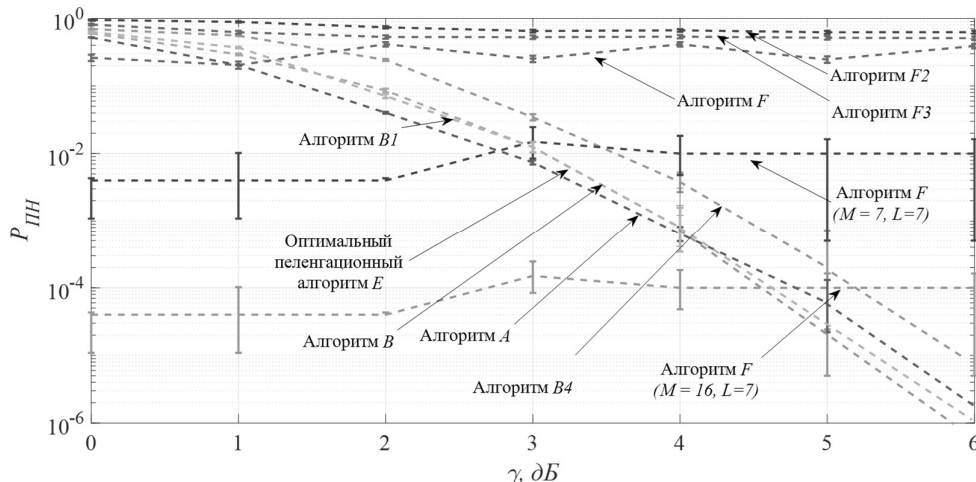


Рис. 4. Зависимость вероятности $P_{\text{ПН}}$ от параметра γ при $P_{\text{ЛТ}} = 10^{-3}$, $C_0/N_0 = 40 \text{ дБ} \cdot \text{Гц}$, $M = 4$ и $L = 3$

Анализ зависимостей на рис. 4 показал значительное преимущество прямых алгоритмов КЦНП (A , B , $B1$ и др.) по сравнению даже с самым эффективным (оптимальным) алгоритмом постобработки (алгоритм F). Так, например, при использовании эквидистантной двумерной АР из 4-х антенных элементов (АЭ) прямой подоптимальный алгоритм $B1$ позволяет достичь значения вероятности $P_{\text{ПН}} = 10^{-5}$ при $\gamma = 6$ дБ. В этих же условиях для метода постобработки (с использованием той же эквидистантной АР в режиме пеленгования) вероятность $P_{\text{ПН}}$ возрастает до значения 10^{-1} . Достижение такого же, как и в прямом методе, значения $P_{\text{ПН}} = 10^{-5}$ возможно лишь при количестве АЭ не менее 16-ти во всем рабочем диапазоне отношений помеха/сигнал γ (от 0 до 6 дБ), а эвристические алгоритмы постобработки ($F1$, $F2$, $F3$) вовсе не работоспособны ($P_{\text{ПН}} > 10^{-1}$) в указанных условиях.

Совместная оценка вычислительной сложности (количество N элементарных операций сложения и умножения на проведение процедуры принятия решения) и достижимой вероятности $P_{\text{ПН}}$ пропуска нарушения для каждого из рассматриваемых алгоритмов, приведена на рис. 5, для условий, когда все параметры как НО, так и ИГНС, являются неизвестными, $M = 3$, $L = 4$, $C_0/N_0 = 40$ дБГц ($h^2 = 10$ дБ), $\gamma = 4$ дБ, $P_{\text{ЛТ}} = 10^{-3}$. Анализируя данные представленные на рис. 5, можно сделать вывод, что минимум вычислительных затрат достигается при использовании подоптимального алгоритма $B4$, в то время как ухудшение вероятности $P_{\text{ПН}}$ при его использовании по сравнению с оптимальным для рассматриваемых условий (алгоритмом E) незначительно. Таким образом, можно сделать вывод, что в большинстве практических случаев, когда параметры НО и ИГНС неизвестны, целесообразно использовать алгоритм $B4$.

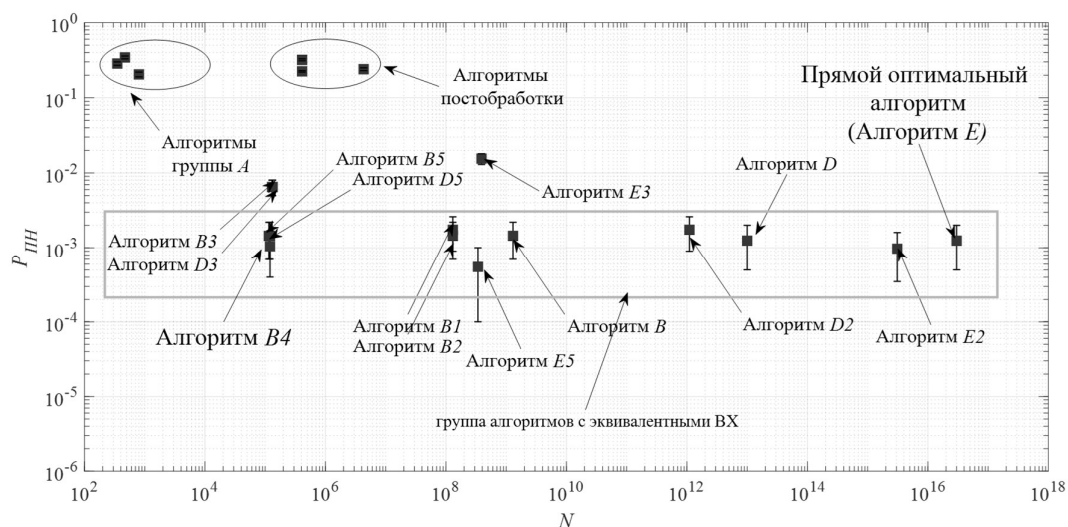


Рис.5. Совместное сравнение вычислительной сложности и ВХ в общем случае полностью неизвестных параметров НО и ИГНС при $M = 3$, $L = 4$, $C_0/N_0 = 40$ дБГц ($h^2 = 10$ дБ), $\gamma = 4$ дБ, $P_{\text{ЛТ}} = 10^{-3}$

В рамках **пятой главы** для проверки адекватности полученных результатов имитационного моделирования было проведено полунатурное моделирование, потребовавшее наличия записей не только реальных сигналов НКА, но и сигналов источника структурной помехи, в качестве которого был использован программно-аппаратный имитатор ИГНС, специально созданный в процессе работы над диссертацией. В процессе работы имитатор производит формирование навигационного поля ГНСС, что предполагает формирование совокупности L навигационных сигналов (т.н. сигналов *псевдо*НКА), которые по своей структуре подобны сигналам НКА,

принятым в точке \mathbf{P}' , координаты которой отличны от координат $\mathbf{P}_{НО}$ НО. При этом оказалось необходимым рассмотреть вопросы, связанные с требованиями к точности формирования таких основных параметров навигационных сигналов, как временные задержки $\tau'^{(l)}(t)$ каждого l -го радионавигационного сигнала ($l=1\dots L$) и соответствующие доплеровские сдвиги $\Delta\omega_d'^{(l)}(t)$ ($l=1\dots L$) несущей частоты. На рис. 6 приведен пример зависимостей вероятности $P_{ПН}$ от отношения помеха/сигнал в условиях, когда при полунатурном моделировании задействован реальный имитатор, формирующий временные задержки $\tau'^{(l)}(t)$ ($l=1\dots L$), пересчитанные в соответствующие дальности, со среднеквадратическими отклонениями (СКО) $\sigma'_{\Delta T}$, а доплеровские сдвиги частот $\Delta\omega_d'^{(l)}(t)$ ($l=1\dots L$) навигационных сигналов – с СКО $\sigma'_{\Delta f_0}$.

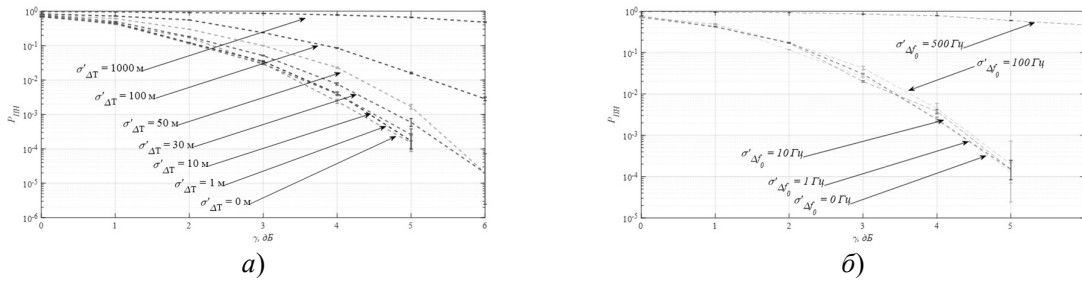


Рис. 6. Влияния погрешностей в установке временных задержек (а) и доплеровских сдвигов несущей частоты (б) при имитации сигналов ИГНС на вероятность $P_{ПН}$ пропуска нарушения при проведении полунатурного моделирования ($C_0/N_0 = 40$ дБГц, $P_{ЛТ} = 10^{-3}$, $M = 2$, $L = 1$).

Из приведенных зависимостей следует, что для значений $P_{ПН}$ в диапазоне $10^{-3}\dots 10^{-5}$ установка временных задержек сигналов в пересчете на соответствующую дальность до псевдоНКА должна производиться с СКО $\sigma'_{\Delta T}$ не более 10 м, что соответствует СКО σ'_p имитации координатных точек также порядка 10 м, поскольку $\sigma'_p = \Gamma \sigma'_{\Delta T}$, где $\Gamma = 1.5\dots 3$ – геометрический фактор группировки ГНСС, а установка доплеровских сдвигов частоты несущих колебаний с СКО $\sigma'_{\Delta f_0}$ не более 10 Гц (соответствует точности имитации скорости перемещения псевдоНКА по орбитам НО порядка 2 м/с). Перечисленные значения параметров $\sigma'_{\Delta T}$ и $\sigma'_{\Delta f_0}$ являются исходными требованиями к имитатору навигационных сигналов для возможности его использования при проведении требуемого в работе полунатурного моделирования. Кроме того, была определена аналитическая зависимость, связывающая $\sigma'_{\Delta T}$ с такими параметрами имитатора, как частота f_r опорного генератора, его относительная δ_{f_r} нестабильность, период T_H дискретного изменения параметров сигналов и разрядность вычислений b_C . В итоге были сформулированы технические требования к имитатору, послужившие основой для разработки реального программно-аппаратного устройства имитации навигационных сигналов диапазона L1, использованного при проведении полунатурного моделирования.

При проведении такого моделирования, схема которого приведена на рис.7, запись реальных радионавигационных сигналов, принимаемых элементами АР, производилась при

наличии созвездия НКА, изображенного на рис. 8а. На данной диаграмме (“skyplot”) отмечены НКА, видимые в момент записи, причем их положение на окружности соответствует угловым направлениям (азимут и склонение), под которыми они видны из точки $P_{НО}$. При этом в качестве координат P' , определяющих параметры сигналов ИГНС, было выбрано положение, отличающееся от координат НО на величину порядка 1600 м, как показано в Таблице 2.

Таблица 2. Исходные данные полунатурного моделирования

Координаты	Широта, град	Долгота, град	Высота над уровнем моря, м
$P_{НО}$	<u>59.9937998</u>	<u>30.3795120</u>	<u>56.5</u>
P'	<u>59.9874327</u>	<u>30.3536052</u>	<u>2.7</u>

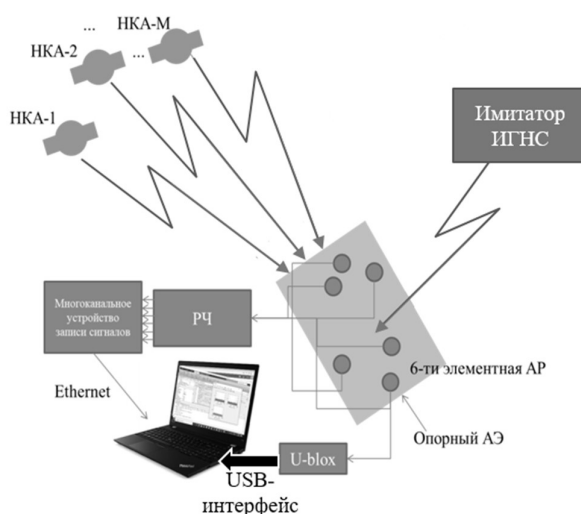


Рис. 7. Схема проведения полунатурного моделирования

Одновременно с записью радионавигационных сигналов производился также контроль показаний в части измерения координат НО стандартным навигационным приемником Ublox-M8T, который был подключен к одному из элементов AP, используемой при эксперименте. При этом в условиях отсутствия помехи сигналы НКА индицировались в интерфейсе навигационного приемника Ublox-M8T, как показано на рис. 8б. В условиях наличия сигналов ИГНС принимаемая сумма сигналов от НКА и от имитатора ИГНС индицировалась как на рис. 8в. Можно заметить, что приведённые примеры индикаций в случае наличия нарушения и в случае его отсутствия качественно не отличались. В то же время, во втором случае отличие измеренных приемником Ublox-M8T значений координат НО от истинных оказалось, как и ожидалось в соответствии с данными таблицы 2, примерно 1600 м. Наличие такой ошибки никак не может быть зафиксировано средствами стандартного навигационного приемника. В то же время, при работе алгоритма В4 с использованием сделанной в тех же условиях записи сигналов, нарушение, напротив, было успешно зафиксировано. После проведения многократных записей реальных радионавигационных сигналов как при наличии сигналов имитатора, так и при их отсутствии, в среде Matlab была осуществлена их обработка в соответствии с выбранным пеленгационным алгоритмом В4 и измерены экспериментальные зависимости вероятностей ложной тревоги $P_{ЛТ}$ и пропуска нарушения $P_{ПН}$. При этом было учтено, что каналы радиоприемного устройства

(РПрУ), с помощью которого производился прием радионавигационных сигналов, не были идентичными. Результат измерения фазовых отстроек между каналами РПрУ приведен в таблице 3, из которой видно, что разности фаз $\Delta\varphi_m$ между опорным ($m=1$) и m -ми каналами достигали 2π рад и более.

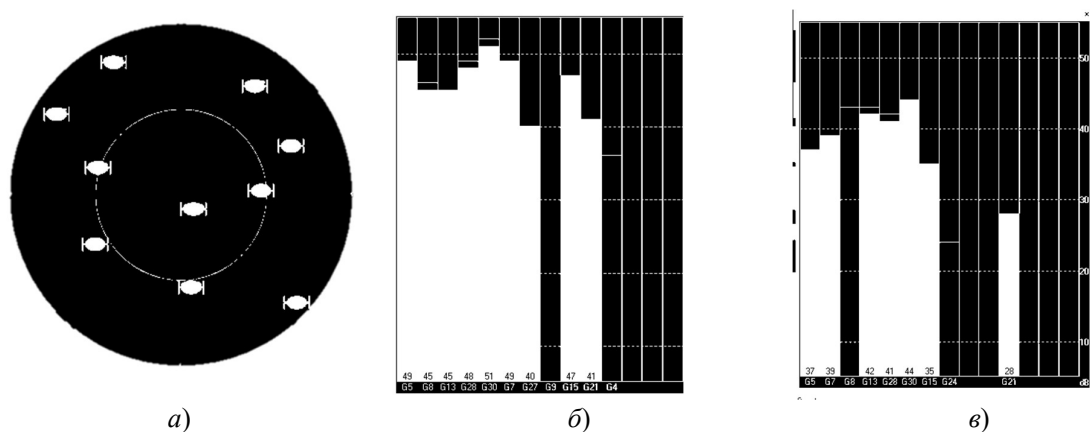


Рис. 8. Вид наблюдаемого созвездия НКА (а), представление обнаруженных радионавигационных сигналов при отсутствии сигналов ИГНС (б) и при их наличии (в) на индикаторе приемника Ublox-M8T

Таблица 3. Измерение неизвестных $\Delta\varphi_m$ фазовых отстроек между каналами РПрУ

	Канал 1	Канал 2	Канал 3	Канал 4	Канал 5	Канал 6
$\Delta\varphi_m$, рад	0	1.699130	-1.650571	0.985480	-1.128182	-0.255712

Прежде всего была рассмотрена модель алгоритма В4, никак не учитывающая наличие неидентичностей между каналами РПрУ. Соответствующие зависимости («БЕЗ компенсации») вероятности $P_{\text{ПН}}$ от порога принятия решения Λ_0 при $L = 3$ представлены на рис. 9, 10 и 11 соответственно, когда $M = 3, 4$ и 5 . На тех же графиках приведены аналогичные кривые, полученные в результате имитационного моделирования для таких же условий, что и при полунатурном моделировании ($\gamma \approx 6$ дБ, $C_0/N_0 = 45...50$ дБГц).

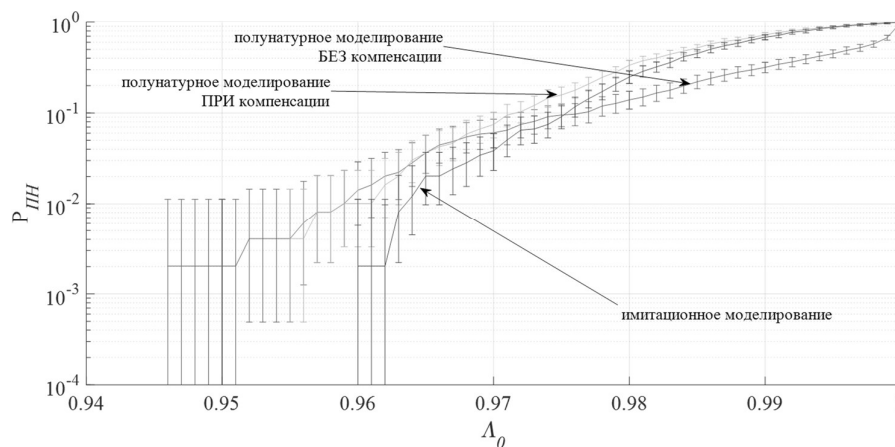


Рис. 9. Вероятность $P_{\text{ПН}}$ пропуска нарушения при $M = 3, L = 3, C_0/N_0 = 45...50$ дБГц, $\gamma = 6$ дБ

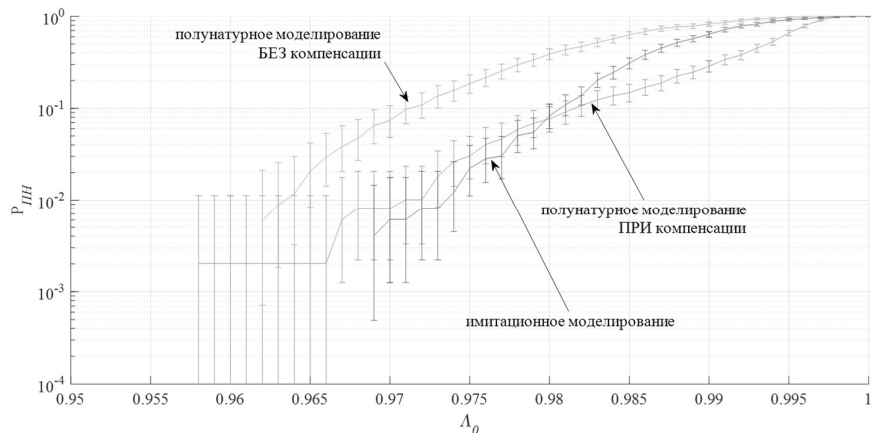


Рис. 10. Вероятность $P_{ПН}$ пропуска нарушения при $M = 4, L = 3, C_0/N_0 = 45...50$ дБГц, $\gamma = 6$ дБ

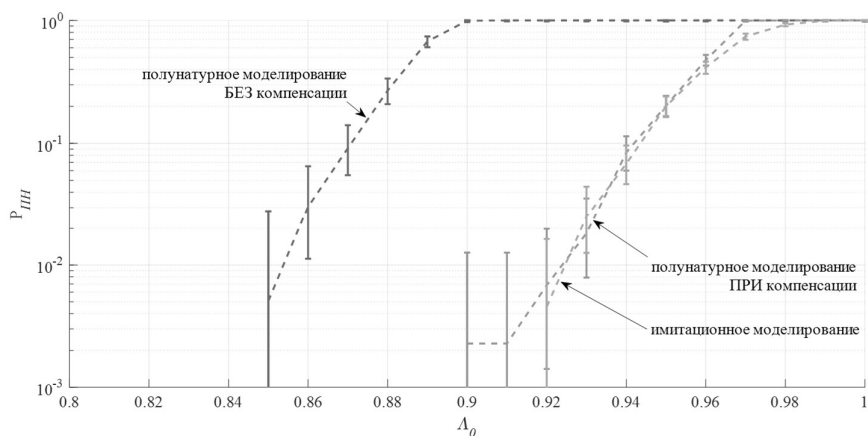


Рис. 11. Вероятность $P_{ПН}$ пропуска нарушения при $M = 5, L = 3, C_0/N_0 = 45...50$ дБГц, $\gamma = 6$ дБ

Как следует из графиков на рис. 9, 10 и 11, с увеличением числа используемых антенных элементов отличие характеристик, получаемых при полунатурном моделировании «без компенсации» от соответствующих характеристик, получаемых при имитационном моделировании, возрастает, так что при числе элементов $M = 4, 5$ (и более) отличие в вероятности пропуска достигает порядка или больше. В результате компенсации различий фазовых характеристик каналов в процессе обработки записей сигналов удалось добиться сближения характеристик, получаемых в обоих типах моделирования. Соответствующие зависимости («ПРИ компенсации») вероятности $P_{ПН}$ от Λ_0 при $L = 3$ представлены на рис. 9, 10 и 11 соответственно, когда $M = 3, 4$ и 5 . Экспериментальные значения вероятности $P_{ПН}$ при $P_{ЛТ} = 10^{-3}$ и других значениях параметров M и L приведены в Таблице 4 и подтверждают высокую эффективность разработанного алгоритма В4 при использовании даже минимального числа элементов АР (два-три), когда число используемых для принятия решения сигналов НКА не менее 4-х.

Т.о. в процессе проведенного эксперимента была симитирована модель нарушения целостности навигационного поля (Таблица 2), которое не в состоянии зафиксировать стандартные средства навигационного обеспечения (например, Ublox-M8T). В то же время, разработанный пеленгационный алгоритм контроля целостности навигационного поля, зафиксировал данное нарушение с вероятностью не менее $1 \cdot 10^{-5}$ при использовании всего лишь

двух элементов АР. При таком малом числе антенных элементов (2-3) оказывается необязательным проведение компенсации фазовых неидентичностей приемных каналов РПрУ, которая, напротив, оказывается необходимой, если используется антенная решетка с более сложной топологией. Кроме этого, как следует из результатов пятой главы, разработанная в четвертой главе диссертации имитационная модель может в достаточной мере заменить экспериментальные исследования, если в ней учитывать (при необходимости) фазовые неидентичности приемных каналов РПрУ.

Таблица 4. Экспериментальные значения $P_{\text{ПН}}$ для пеленгационного алгоритма В4 при $P_{\text{ЛТ}} = 10^{-3}$

$L \backslash M$	2	3	4	5
1	0.5	0.5	0.5	0.5
2	0.3	10^{-1}	$\sim 10^{-5}$	$< 10^{-5}$
3	0.2	10^{-3}	$< 10^{-5}$	$< 10^{-5}$
4	$\sim 10^{-5}$	$< 10^{-5}$	$< 10^{-5}$	$< 10^{-5}$

В **Заключении** диссертации сформулированы достигнутые результаты и основные выводы по работе:

1. Синтезированный в процессе работы прямой оптимальный (в соответствии с обобщенным критерием отношения правдоподобия) алгоритм КЦНП показал на порядок меньшее значение вероятности $P_{\text{ПН}}$ пропуска нарушения по сравнению с ранее известными эвристическими пеленгационными алгоритмами КЦНП. В то же время, вычислительная сложность такого оптимального алгоритма оказывается достаточно высокой в связи с необходимостью проведения процедур численной максимизации по большому (не менее 6-ти) количеству неизвестных параметров функций правдоподобия.
2. Среди различных мер, направленных на сокращение вычислительных затрат применительно к синтезированному прямому оптимальному алгоритму, наименьшую вычислительную сложность при незначительном повышении (не более, чем в несколько раз) вероятности $P_{\text{ПН}}$ пропуска нарушения обеспечивает переход к подоптимальной форме, полученной при условии значительного отличия истинных координат НО и ошибочных координат, обусловленных сигналами ИГНС (алгоритм В4).
3. Любые из рассмотренных в работе алгоритмов КЦНП с постобработкой пеленгационных измерений (как оптимальные, так и эвристические) значительно проигрывают прямым алгоритмам КЦНП. Так, наблюдаемый в процессе имитационного моделирования проигрыш достигает нескольких порядков и более в вероятности $P_{\text{ПН}}$.
4. Проведенное полунатурное моделирование с использованием реальных записей сигналов НКА и ИГНС с элементов АР подтвердило высокую эффективность синтезированного подоптимального алгоритма В4, выявленную на этапе имитационного моделирования. Так, при значении отношения уровня сигналов ИГНС к уровню сигналов НКА $\gamma \approx 3...6\text{дБ}$ вероятность $P_{\text{ПН}} \approx 10^{-5}...10^{-3}$ при $P_{\text{ЛТ}} \approx 10^{-3}$ может быть обеспечена при использовании минимального числа элементов АР (два-три), когда число используемых для принятия решения сигналов не менее 4-х, что в свою очередь, является минимальным требуемым числом видимых НКА для любой современной ГНСС.
5. Для полунатурного исследования характеристик системы КЦНП в диапазоне $P_{\text{ПН}} \approx 10^{-5}...10^{-3}$ и $P_{\text{ЛТ}} \approx 10^{-5}$ используемый имитатор группы навигационных сигналов должен обеспечивать точность имитации координатных точек порядка 1 м.

6. В результате полунатурного моделирования показано, что при реализации алгоритма КЦНП с применением радиоприемной аппаратуры с малым числом элементов АР (два-три) точная компенсация фазовых неидентичностей приемных каналов не является обязательной, в то время как при большем числе элементов АР такая компенсация оказывается необходимой.

В **Приложении А** приводятся основные сведения о разработанном и созданном программно-аппаратном имитаторе сигналов ИГНС. Приведено подробное описание процесса имитации навигационного поля и получены функциональные схемы реализации процесса имитации в цифровом виде для основных видов навигационных сигналов (GPS, ГЛОНАСС). На основе предложенных функциональных схема получены аналитические зависимости, связывающие точность имитации координатных точек с основными техническими параметрами имитатора.

Публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ

1. Рачицкая А.П., Полунатурное моделирование алгоритма контроля целостности навигационного поля ГНСС // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление.
2. Мелихова А. П. *, Цикин И. А. Алгоритмы принятия решения при пеленгационном методе контроля целостности навигационного поля. //Радиотехника. – Москва, 2018. – №. 1. – С. 63-75.
3. Мелихова А.П. *, Цикин И.А. Оптимизация алгоритма принятия решения для пеленгационного метода контроля целостности навигационного поля с учетом реальных конфигураций созвездий ГНСС // Радиотехника. – Москва, 2016. – № 12. – С. 134–143
4. Мелихова А.П. *, Цикин И.А. Эффективность пеленгационного метода контроля целостности навигационного поля при многократных наблюдениях // Радиотехника. – Москва, 2015 – №9. – С. 69-77
5. Мелихова А.П. *, Цикин И.А. Пеленгационный метод контроля целостности поля глобальных навигационных спутниковых систем// Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. Выпуск 1(212)/2015. С. 29 -38.
6. Давыденко А.С., Мелихова А.П. * Повышение достоверности определения координат по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем путем пространственно-временной обработки сигналов// Успехи современной радиоэлектроники, Выпуск 7, 2015, С 63-67

Статьи в сборниках материалов международных конференций, входящих в перечень Scopus

1. Rachitskaya A. P., Oshuev A. M. Estimation of the GNSS signal time-of-arrival in the presence of a Gaussian interference located in space //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1326. – №. 1. – С. 012047
2. Rachitskaya A. P., Tsikin I. A. GNSS Integrity Monitoring in Case of a Priori Uncertainty About User's Coordinates //2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). – IEEE, 2018. – С. 83-87
3. Melikhova A. P. * *, Tsikin I. A. Optimum Array Processing with Unknown Attitude Parameters for GNSS Anti-Spoofing Integrity Monitoring //2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). – IEEE, 2018. – С. 1-4
4. A. P. Melikhova * * and I. A. Tsikin, Decision-Making Algorithms Based on Generalized Likelihood Ratio Test for Angle-of-Arrival GNSS Integrity Monitoring. // 2018 25th anniversary Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems proceedings. – IEEE, 2018. – С. 204-207
5. I. A. Tsikin, A. P. Melikhova * *. Direct Signal Processing for GNSS Integrity Monitoring // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems – Springer, 2017 – С. 635-643
6. I. Tsikin, A. Melikhova * * Angle-of-Arrival GPS Integrity Monitoring Insensitive to Satellite Constellation Geometry. // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. – Springer, 2016. – Т. 9870 – С. 584-592
7. A. Melikhova * *, I. Tsikin Antenna Array With a Small Number of Elements for Angle-of-Arriving GNSS Integrity Monitoring // Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2016 39th International Conference on on Telecommunications and Signal Processing (TSP). – IEEE, 2016. – С. 190-193
8. Tsikin I.A., Melikhova A.P. * * 'Optimization of Angle-of-Arrival GPS Integrity Monitoring// Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems Volume 9247 of the series Lecture Notes in Computer Science, 2015, pp 722-728

Остальные публикации по теме исследования (РИНЦ)

1. Попов Е. Н., Рачицкая А. П., Давыденко А. С. Исследование влияния характеристик аналогового тракта приемника ГНСС на эффективность работы адаптивного алгоритма пространственной

- фильтрации помех //Цифровая обработка сигналов и её применение–DSPA-2019. – 2019. – С. 437-442
2. Ошуев А.М., Рачицкая А.П., Исследование адаптивных алгоритмов пространственной фильтрации помех для глобальных навигационных спутниковых систем // Неделя науки СПбПУ материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – СПб, 2018. – С. 25-28
 3. Мелихова А.П. *, Цикин И.А. Оптимальная обработка сигналов антенной решетки при реализации процедуры контроля целостности навигационного поля. // 20-я международная конференция "Цифровая обработка сигналов и ее применение". Доклады. 2018. – СПб, 2018. – С. 492-496
 4. Мелихова А.П. *, Ошуев А.М., Исследование эффективности использования сигналов GPS L5 для позиционирования объектов // Неделя науки СПбПУ материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – СПб, 2017. – С. 42-45
 5. Климов А.А., Мелихова А.П. * Оптимизация алгоритма контроля целостности навигационного поля с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра "Политехнический" // Неделя науки СПбПУ Материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – СПб, 2016. – С. 40-42
 6. Мелихова А.П. *, Толубаев М.Н. Позиционирование пользователей на основе использования имитаторов навигационных сигналов // Неделя науки СПбПУ Материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – СПб, 2016. – С. 71-73
 7. Мелихова А.П. *, Цикин И.А. Пространственно-временная обработка сигналов в задаче контроля целостности поля глобальных спутниковых навигационных систем // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. – Москва, 2016. – Т. 6. – № 3. – С. 506-509
 8. Мелихова А.П. *, Цикин И.А. Обнаружение внутрисистемных нарушений целостности навигационного поля пеленгационным методом контроля // Неделя науки СПбПУ материалы научного форума с международным участием. Лучшие доклады. Ответственные редакторы: В.Э. Гасумянц, Д.Д. Каров. – СПб, 2016. – С. 146-149
 9. Мелихова А.П. *, Цикин И.А. Вероятностные характеристики пеленгационного метода контроля целостности поля глобальных навигационных спутниковых систем // Научный форум с международным участием "Неделя науки СПбПУ" Материалы научно-практической конференции. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций СПбПУ. Ответственные редакторы - В.Э.Гасумянц, Д.Д.Каров. – СПб, 2015. – С. 39-42
 10. Мелихова А.П. *, Цикин И.А., Двухкоординатный пеленгатор для решения задачи контроля целостности навигационного поля систем ГЛОНАСС/GPS // Неделя науки СПбПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Лучшие доклады. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014, с. 109 – 113

* «Мелихова» – предыдущая фамилия автора (Рачицкой А.П.)

* * «Melikhova» (англ.) — предыдущая фамилия автора (Рачицкой А.П.)