



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
(РОСАВИАЦИЯ)**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ  
АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

**ФАКУЛЬТЕТ** Авиационных систем и комплексов

**КАФЕДРА** ТЭРЭО ВТ

**Направление подготовки** 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы  
(код и наименование направления подготовки)

СВЯЗИ

**Направленность** Радиолокация и радионавигация

**НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

**Тема** Алгоритмы комплексной первичной обработки ВОС-сигналов СРНС  
в составе бортового навигационного оборудования воздушных судов  
гражданской авиации

**Обучающийся:**

Шикалов В.Н.  
(Ф.И.О.)

(Подпись)

**Научный руководитель:**

к.т.н., доцент Кудинов А.Т.  
(уч.степень, уч.звание, Ф.И.О.)

(Подпись)

**Рецензенты:**

к.т.н., доцент Гевак Н.В.  
(уч.степень, уч.звание, Ф.И.О.)

(Подпись)

к.т.н., доцент Стукалов С.Б.  
(уч.степень, уч.звание, Ф.И.О.)

(Подпись)

**Работа допущена к защите:**

**Заведующий кафедрой**

д.т.н., доцент Болелов Э.А.  
(уч.степень, уч.звание, Ф.И.О.)

(Подпись)

**МОСКВА 2023**

Актуальность темы исследования продиктована необходимостью разработки и исследования алгоритмов оптимальной обработки современных навигационных сигналов (в том числе при комплексировании с другими средствами навигации) в следствии ужесточения требований для навигационных определений по точности и помехоустойчивости.

Круг задач, решаемых глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС), и требования, предъявляемые к ним по точности и надёжности навигационных определений, их оперативности, устойчивости к помехам и при работе в условиях многолучевости, электромагнитной совместимости, растут с каждым годом. В настоящее время все диапазоны частот, в частности L диапазон, который отведён для ГНСС, практически уже заняты существующими системами. В таких условиях любое перераспределение или выделение каких-либо новых частот представляет собой сложную проблему, что обуславливает требование как можно более эффективного использования каждого диапазона с максимальной плотностью радиоэлектронных устройств и систем на единицу полосы частот. Всё это вызывает необходимость исследования и внедрения в практику ГНСС новых более совершенных навигационных сигналов, например, меандровых шумоподобных (широкополосных) сигналов (МШПС), ВОС-сигналов, и разработки алгоритмов функционирования устройств и систем, осуществляющих оптимальную обработку сигналов такого рода в целях повышения эффективности навигационных определений в целом.

Особенность МШПС, выделяющая их из традиционных шумоподобных сигналов (ШПС), используемых сегодня в ГНСС ГЛОНАСС, заключается в наличии в составе модулирующей функции ВОС-сигналов меандрового поднесущего колебания (МПК), длительность меандровых импульсов которого в коэффициент кратности раз короче длительности элемента прямоугольной псевдослучайной последовательности (ППСП).

Более эффективное использование частотного спектра применительно к L диапазону в условиях заметно растущего числа пользователей ГНСС становится



реализуемым благодаря появившейся возможности формирования на одной и той же несущей частоте сигналов с различными спектрами за счёт изменения коэффициента кратности меандровых импульсов в структуре ВОС-сигналов.

Последнее обстоятельство позволяет обеспечить одновременное функционирование навигационных систем с традиционными и новыми радиосигналами, что достигается благодаря «расщеплению» спектра у ВОС-сигналов (при четном числе импульсов в меандровом символе (МС)).

Кроме того, можно ожидать достижения более высоких точности и помехозащищенности ГНСС, использующих подобные сигналы, за счет обострения основного пика корреляционной функции (КФ) ВОС-сигналов в силу применения более коротких видеоимпульсов в МС.

#### **Определение объекта и предмета исследования.**

**Объект исследования:** навигационное оборудование.

**Предмет исследования:** алгоритмы комплексной первичной обработки информации в аппаратуре потребителя применительно к ВОС-сигналам.

**Цель научной работы:** повышение качества навигационного обеспечения воздушных судов ГА за счёт применения синтезированных алгоритмов.

**Поставленная цель достигается решением следующих основных задач:**

1. Выявление путей повышения качества функционирования бортового оборудования ГНСС в составе навигационного комплекса воздушных судов ГА;
2. Поиск решений, направленных на совместимость и взаимодополняемость применения технологий российских и китайских ГНСС;
3. Синтез алгоритмов комплексной первичной обработки информации бортовых радионавигационных средств;
4. Оценка качества синтезированных алгоритмов;
5. Разработка методики расчета потенциальных и фактически достижимых характеристик точности и помехоустойчивости системы комплексной обработки сигналов.

**Методы исследования:** поставленные задачи решаются методами марковской теории оценивания случайных процессов путем поэтапного решения уравнения Стратоновича и гауссовской аппроксимации апостериорной плотности вероятности (АПВ).

**Научная новизна:**

- выявлены пути повышения качества функционирования бортового оборудования ГНСС в составе навигационного комплекса воздушных судов гражданской авиации (ГА);
- синтезированы алгоритмы комплексной обработки информации бортовых радионавигационных средств;
- разработана методика проведения анализа потенциальных характеристик качества функционирования бортовой системы комплексной обработки информации (КОИ);
- рассчитаны потенциально достижимые характеристики точности и помехоустойчивости бортовой интегрированной системы КОИ при совместной первичной обработке радиосигналов СРНС ГЛОНАСС и БЭЙДОУ;
- проведен сравнительный анализ потенциально достижимых характеристик точности и помехоустойчивости алгоритмов комплексной обработки информации в бортовой интегрированной АП ГЛОНАСС ГЛОНАСС и БЭЙДОУ с совместной и со структурно отдельной первичной обработкой радиосигналов.

**Практическая значимость:** использование комплексирования на уровне первичной обработки информации, с учётом имеющейся при этом информационной избыточности, позволяет существенно повысить помехоустойчивость и уменьшить ошибки измерения навигационных параметров воздушных судов. При этом бортовая интегрированная система КОИ, построенная на основе ГНСС ГЛОНАСС, БЭЙДОУ и ИНС, имеет лучшие характеристики точности и помехоустойчивости по сравнению с системой комплексной обработки радиосигналов от минимально необходимого количества НКА ГЛОНАСС и выходных данных ИНС.



### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритмы комплексной первичной обработки информации бортовых радионавигационных средств;
2. Результаты оценки качества функционирования синтезированных алгоритмов методами математического и натурного моделирования комплексной системы;
3. Методика проведения анализа потенциальных характеристик качества функционирования бортовой системы комплексной обработки информации.

### **Результаты научной работы использованы в ИНИР:**

«Исследование путей повышения качества функционирования глобальных навигационных спутниковых систем на основе комплексной обработки сигналов ГНСС ГЛОНАСС и БЭЙДОУ. Анализ особенностей функционирования ГНСС ГЛОНАСС и БЭЙДОУ».

Основные положения научной работы докладывались, обсуждались и публиковались в рамках: 55-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. «Функциональное диагностирование бортового навигационного оборудования ВС». Калуга, 2020; Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию МГТУ ГА. «Применение алгоритмов идентификации и адаптивного оценивания к задачам функционального диагностирования бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации.» Москва, 2021; Всероссийской научно-технической конференции XIX Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского. «Алгоритмы комплексной обработки информации глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и Бэйдоу в бортовой аппаратуре воздушных судов.» Москва, 2022; в Научном вестнике ГосНИИ ГА № 40. «Алгоритмы комплексной обработки информации глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и Бэйдоу в бортовой аппаратуре воздушных судов.» Москва, 2022. Входит в ВАК.

Научная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения.

**В первом разделе** рассматривается анализ условий применения спутниковых радионавигационных систем в составе бортового навигационного оборудования воздушных судов гражданской авиации.

Существенного повышения качества функционирования СРНС ГЛОНАСС можно достичь за счет интегрирования ее с другими РНС, а также путем совершенствования средств и методов контроля целостности системы.

Применение дифференциального режима позволяет повысить точность навигационных определений за счет компенсации систематических составляющих погрешностей местоопределения ВС. Если при этом реализовать алгоритмы контроля целостности, то станет возможна передача информации о целостности системы по каналам передачи корректирующей информации.

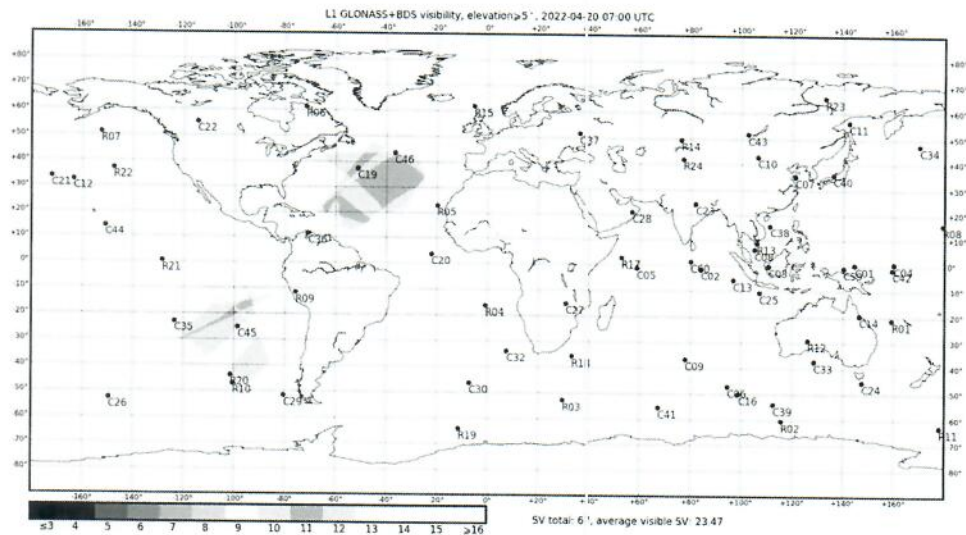
Кроме того, можно ожидать достижения более высоких точности и помехозащищенности ГНСС, использующих ВОС-сигналы, за счет обострения основного пика корреляционной функции (КФ) ВОС-сигналов в силу применения более коротких видеоимпульсов в МС.

Однако использование такого рода сигналов имеет ряд недостатков, связанных с трудностями захвата и обеспечения однозначного слежения за основным пиком КФ. Вместе с отмеченными особенностями, функционирование ГНСС в интересах навигационного обеспечения воздушных судов (ВС) гражданской авиации (ГА) осложняется следующими факторами: плохая геометрия видимых НКА; вероятности возникновения сильных радиопомех от непреднамеренных и преднамеренных радиоизлучателей; локальные неоднородности ионосферы.

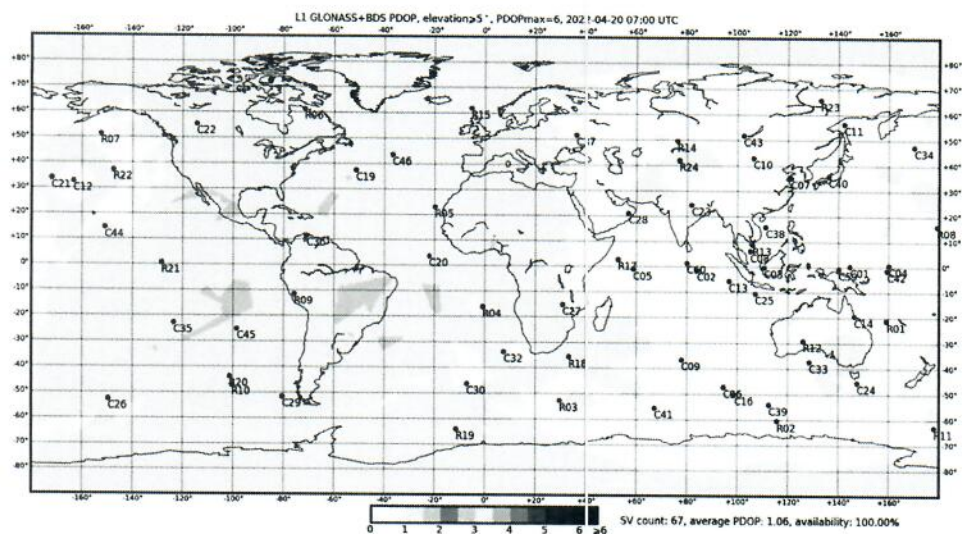
Устойчивость функционирования ГНСС в подобных аномальных условиях существенно зависит от помехоустойчивости приёмников потребителей. Помехоустойчивые приёмники ГНСС могут быть построены на основе их комплексирования с другими измерителями и реализации методов первичной оптимальной (субоптимальной) обработки радиосигналов.



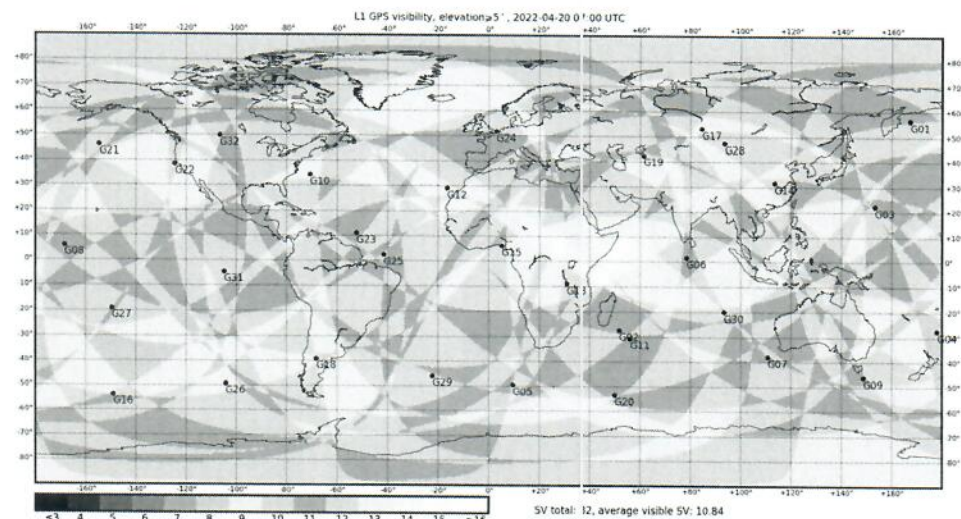
Мониторинг количества видимых на территории Российской Федерации НКА и значений геометрического фактора, определяющего характеристики точности различных ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, Галилео, БЭЙДОУ) показывает, что в большей степени для построения интегрированной приемоиндикаторной аппаратуры, реализующей алгоритмы комплексной первичной обработки, подходят российская ГНСС ГЛОНАСС и китайская БЭЙДОУ (BDS). В частности (см. рис. 1–4), количество навигационных спутников составляет в среднем 23, а значение геометрического фактора PDOP в среднем не превышает 1,06, в то время как для GPS эти показатели составляют 10 видимых спутников, а значение геометрического фактора PDOP – 1,56 и выше.



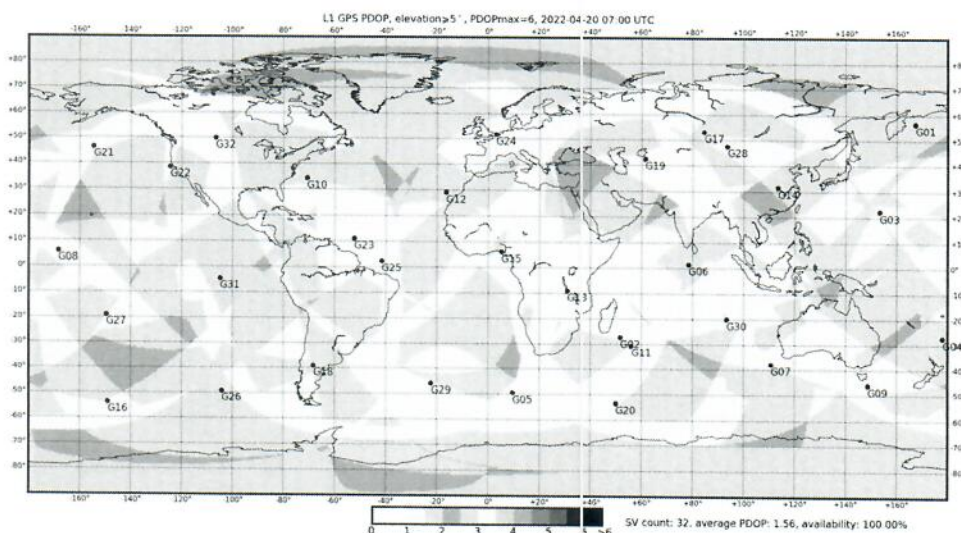
**Рис. 1.** Количество видимых спутников ГНСС ГЛОНАСС+БЭЙДОУ



**Рис. 2.** Значение геометрического фактора ГНСС ГЛОНАСС+БЭЙДОУ



**Рис. 3.** Количество видимых спутников ГНСС GPS



**Рис. 4.** Значение геометрического фактора ГНСС GPS

Кроме того, тот факт, что в ГНСС БЭЙДОУ изначально используются ВОС сигналы, а в ГНСС ГЛОНАСС наряду с ВОС-сигналами применяются традиционные ШПС, позволяет предположить, что использование этих сигналов в системе комплексной первичной обработки информации в составе навигационного оборудования ВС повысит эффективность навигационных определений на различных этапах полёта. Также не следует отказываться от использования информации от нерадийотехнических систем, в первую очередь инерциальных навигационных систем (ИНС). Использование такого рода информационной избыточности позволит повысить помехоустойчивость



системы комплексной обработки информации (КОИ) и в значительной мере устранить недостатки, обусловленные особенностью структуры и принципами формирования ВОС-сигналов.

Актуальность исследований в данном направлении также подтверждается подписанием в ноябре 2021 года российско-китайской дорожной карты в области спутниковой навигации на 2021–2025 годы. Опираясь на имеющиеся достижения и стремясь обеспечить интегрированное и инновационное развитие систем ГЛОНАСС и БЭЙДОУ, стороны определили следующие задачи и направления совместного сотрудничества: обеспечение совместимости и взаимодополняемости систем ГЛОНАСС и БЭЙДОУ, развитие функциональных дополнений и измерительных станций, осуществление мониторинга и оценки характеристик ГНСС, а также реализация проектов по совместному применению технологий ГНСС.

**Во втором разделе** проводится синтез оптимальных и субоптимальных алгоритмов комплексной обработки информации в бортовой интегрированной аппаратуре потребителей СРНС ГЛОНАСС и БЭЙДОУ.

Решение задачи синтеза алгоритмов КОИ в АП ГНСС выполнено методами марковской теории оценивания случайных процессов путем поэтапного решения уравнения Стратоновича и гауссовской аппроксимации апостериорной плотности вероятности (АПВ).

Возможность применения метода поэтапного решения уравнения Стратоновича обусловлена обоснованным упрощением моделей оцениваемых процессов, суть которого заключается в описании динамики вектора состояния  $\mathbf{X}(t)$  на полуинтервалах  $[t_k, t_k + T)$  квазислучайным процессом:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{f}(t, \mathbf{X}_k), [t_k, t_k + T), \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0$$

где  $\mathbf{f}(\cdot)$  – известная векторная функция своих аргументов.

Представление вектора состояния в виде квазислучайного процесса позволяет свести задачу нелинейного оценивания к задаче нелинейной оценки

параметров. При этом удаётся получить аналитическое решение соответствующего уравнения Стратоновича.

Кроме того, использование гауссовской аппроксимации АПВ позволяет получить выражения для апостериорных математических ожиданий и центральных моментов 2-го порядка, которые определяют субоптимальные алгоритмы формирования оценок вектора состояния на первом этапе, т. е. на этапе обработки наблюдений. Указанные алгоритмы для первого этапа описываются следующими выражениями:

$$\mathbf{X}^*(t_k|t_k+T) = \mathbf{X}^*(t_k) + R(t_k|t_k+T) \sum_{i=1}^I \lambda_{ik}^* L_i' \Phi_i'^T, \quad (1)$$

$$R(t_k|t_k+T) = \left\{ R^{-1}(t_k) - \sum_{i=1}^I \lambda_{ik}^* L_i' \Phi_i''^T L_i'^T \right\}^{-1}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{X}^*(t_k|t_k+T)$  – оценка вектора состояния на первом этапе;  $R(t_k|t_k+T)$  – матрица апостериорных центральных моментов 2-го порядка;  $\mathbf{X}^*(t_k)$  и  $R(t_k)$  – оценка вектора состояния и матрица апостериорных центральных моментов 2-го порядка после проведения наблюдений  $\Xi(t)$  на предыдущем интервале;

$$\Phi_i' = \int_{t_k}^{t_k+T} \left[ \frac{\partial F_i(\tau, \mathbf{Y}_{ik})}{\partial \mathbf{Y}_{ik}} \right]^T d\tau \bigg|_{\mathbf{Y}_{ik}=\mathbf{Y}_i^*(t_k)}, \quad \Phi_i'' = \int_{t_k}^{t_k+T} \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{Y}_{ik}} \right]^T \left[ \frac{\partial F_i(\tau, \mathbf{Y}_{ik})}{\partial \mathbf{Y}_{ik}} \right] d\tau \bigg|_{\mathbf{Y}_{ik}=\mathbf{Y}_i^*(t_k)}$$

– первая и вторая производные логарифма функционала правдоподобия (ЛФП) по компонентам вектора радионавигационных параметров  $\mathbf{Y}_i$ , вычисленные при  $\mathbf{Y}_{ik} = \mathbf{Y}_i^*(t_k)$ ;

$$F_i(\tau, \mathbf{Y}_{ik}) = \mathbf{N}_i^{-1} \left\{ 2\xi_i(t) \tilde{S}_i(t, L_i\{\mathbf{f}(t, \mathbf{X}_k)\}) - \tilde{S}_i^2(t, L_i\{\mathbf{f}(t, \mathbf{X}_k)\}) \right\} \bigg|_{\mathbf{X}_k=\mathbf{X}^*(t_k)}$$

– производная по времени от ЛФП;



$$L'_i = \frac{\partial L_i\{\mathbf{f}(t, \mathbf{X}_k)\}}{\partial \mathbf{X}_k} \Big|_{\mathbf{X}_k := \mathbf{X}^*(t_k)}$$

– матрица прямого преобразования координат, элементы которой для  $t \in [t_k, t_k + T)$  можно считать постоянными.

Используемые в (1) и (2) оценки параметров отказов  $\lambda_{ik}^*$  формируются на основе апостериорных вероятностей, вычисленных в соответствии с выражением

$$p_{ij}(t_k + T | \mathbf{X}_k) = C p_{ij}(t_k + T | \mathbf{X}_k) \exp \int_{t_k}^{t_k + T} F_i(t, L_i\{\mathbf{f}(t, \mathbf{X}_k)\}, \lambda_{ik} := j) dt, \quad j=0,1, \quad (3)$$

где  $C$  – постоянный множитель, определяемый из условия нормировки;

$$p_{ij}(t_k | \mathbf{X}_k) = \sum_{l=0}^1 \pi_{lj}^i p_{ij}(t_{k-1} | \mathbf{X}_k).$$

При этом в качестве оптимальной оценки  $\lambda_{ik}^*$  выбирается значение параметра отказа, для которого апостериорная вероятность (6) максимальна:

$$\lambda_{ik}^* = \lambda_{ik} : \max_j p_{ij}(t_k + T | \mathbf{X}_k), \quad j=0,1. \quad (4)$$

На втором этапе, т. е. при обработке дискретных наблюдений в моменты времени  $t_k = t_0 + kT$ ,  $k=0,1,2,\dots$ , используются алгоритмы, полученные на основе решения рекуррентного уравнения Стратоновича:

$$\mathbf{X}^*(t_{k+1}) = \mathbf{X}_{\text{пр}} + K(t_{k+1}) [\Xi_{\text{и}}(t_{k+1}) - \Phi_{EE}(t_k) \Xi_{\text{и}}(t_{k+1}) - \Phi_{\Xi x}(t_k) \mathbf{X}^*(t_k | t_k + T)], \quad (5)$$

$$K(t_{k+1}) = [\Phi_{xx} R(t_k | t_k + T) \Phi_{\Xi x}^T + B_{x\Xi}] [\Phi_{\Xi x} R(t_k | t_k + T) \Phi_{\Xi x}^T + B_{\Xi\Xi}]^{-1}, \quad (6)$$

$$R(t_{k+1}) = [\Phi_{xx} R(t_k | t_k + T) \Phi_{xx}^T + B_{xx}] - K(t_{k+1}) [\Phi_{xx} R(t_k | t_k + T) \Phi_{\Xi x}^T + B_{\Xi x}]^T, \quad (7)$$

где  $X_{\text{пр}} = \Phi_{xx} X^*(t_k | t_k + T) + \Psi U(t_k)$ ,  $R(t_{k+1})$  – матрица апостериорных центральных моментов 2-го порядка после проведения наблюдения (2);  $\Phi_{xx}$ ,  $\Psi$ ,  $\Phi_{\Xi x}$ ,  $B_{\Xi x}$  – известные матрицы.

На втором этапе в качестве начальных значений берутся оценка вектора состояния  $X^*(t_k | t_k + T)$  и матрица апостериорных центральных моментов 2-го порядка  $R(t_k | t_k + T)$ , полученные на первом этапе в соответствии с (1) и (2).

Как видно из (1) и (2), основными элементами алгоритмов для первого этапа являются многомерные дискриминаторы, количество которых соответствует числу одновременно принимаемых сигналов от всех  $I$  видимых НКА.

Алгоритм контроля целостности состоит из  $I$  идентичных каналов, в каждом из которых согласно (3) и (4) осуществляется формирование оценки параметра отказа  $\lambda_{ik}^*$  соответствующего информационного канала.

В соответствии с (5)–(7) окончательные оценки  $X^*(t_{k+1})$  формируются на основе совместной обработки оценок  $X^*(t_k | t_k + T)$  и наблюдений  $\Xi_{\text{и}}(t_k)$ , поступающих с выхода ИНС в момент времени  $t_{k+1}$ .

Особенностью синтезированных субоптимальных алгоритмов является наличие перекрестных связей между каналами обработки сигналов от различных НКА на уровне первичной обработки сигналов.

Наличие перекрестных связей между каналами обработки радиосигналов на уровне первичной обработки создаёт определённые трудности при их практической реализации и усложняет процедуру реконфигурации интегрированной системы. Так, при изменении в соответствии с текущими условиями функционирования состава совместно обрабатываемых сигналов потребуется изменять структуру алгоритмов, реализуемых на уровне первичной обработки радиосигналов. Кроме того, необходимо учитывать, что концепция создания интегрированных радионавигационных систем предусматривает



использование радионавигационного поля и других систем. Поэтому при включении в состав интегрированной системы новых измерителей на основе описанной методики синтеза возникнет необходимость изменения тех её блоков и устройств, в которых реализуется обработка собственно радиосигналов, что затруднит дальнейшую модификацию уже созданной бортовой интегрированной АП. Учитывая указанные недостатки, свойственные синтезированным алгоритмам, проведём дальнейшее упрощение и получим субоптимальные алгоритмы, которые позволят производить структурно раздельную комплексную обработку радиосигналов рассматриваемого класса на уровне первичной обработки информации.

Перекрестные связи между каналами обработки радиосигналов (КОРС) на уровне первичной обработки информации можно попытаться исключить, если выполнить их синтез в координатах радионавигационных параметров соответствующих полезных радиосигналов, а затем получить алгоритмы совместной обработки выходных данных этих каналов и ИНС в координатах вектора состояния.

Предлагаемый подход к разработке подобных алгоритмов КОИ со структурно раздельной первичной обработкой радиосигналов ГНСС ГЛОНАСС и БЭЙДОУ заключается в последовательном синтезе КОРС, на выходе которых формируются оценки параметров соответствующих радиосигналов (псевдодальностей, псевдоскоростей, случайных фаз) и алгоритмов совместной обработки выходных данных этих каналов совместно с данными ИНС.

Рассмотрим векторы радионавигационных параметров  $\mathbf{Y}_i^T(t) = [d_i, \dot{d}_i, \varphi_i, \Delta\omega_i]$ ,  $i = \overline{1, I}$ , от которых непосредственно зависят полезные сигналы  $S_i[t, \mathbf{Y}_i, \vartheta_{ik}, \lambda_{ik}]$ .

Для задания динамики изменения векторов  $\mathbf{Y}_i(t)$  на характерных полуинтервалах  $[t_k, t_k + T)$  воспользуемся моделью в виде квазислучайного процесса:

$$\mathbf{Y}_i(t) = \mathbf{A}_i(t, \mathbf{Y}_{ik}), t \in [t_k, t_k + T), \mathbf{Y}_i(t_0) = \mathbf{Y}_{i0},$$

где  $\mathbf{A}_i(\cdot)$  – известная векторная функция своих аргументов.

При этом квазиоптимальные в гауссовском приближении 1-го порядка алгоритмы обработки наблюдений  $\xi_i(t), i=\overline{1, I}$ , на временном полуинтервале  $[t_k, t_k+T)$ , полученные на основе решения соответствующего уравнения Стратоновича на этапе обработки радиосигналов, применительно к одному из каналов описываются выражениями:

$$\mathbf{Y}_i^*(t_k|t_k+T) = \mathbf{Y}_i^*(t_k) + R_i(t_k|t_k+T) \lambda_{ik}^* \int_{t_k}^{t_k+T} \left[ \frac{\partial F_i(\tau, \mathbf{Y}_{ik}^*)}{\partial \mathbf{Y}_{ik}^*} \right]^T d\tau = \mathbf{Y}_i^*(t_k) + R_i(t_k|t_k+T) \lambda_{ik}^* \Phi_i'(t_k+T), \quad (8)$$

$$R_i(t_k|t_k+T) = \left\{ \tilde{R}_i^{-1}(t_k) - \lambda_{ik}^* \int_{t_k}^{t_k+T} \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{Y}_{ik}^*} \right]^T \left[ \frac{\partial F_i(\tau, \mathbf{Y}_{ik}^*)}{\partial \mathbf{Y}_{ik}^*} \right] d\tau \right\}^{-1} = \left\{ \tilde{R}_i^{-1}(t_k) - \lambda_{ik}^* \Phi_i''(t_k+T) \right\}^{-1}, \quad (9)$$

$$\tilde{R}_i^{-1}(t_k) = L_i'^T(\mathbf{X}_k^*) R_k L_i'(\mathbf{X}_k^*), \quad L_i'(\mathbf{X}_k^*) = \left[ \frac{\partial L_i(\mathbf{X}_k^*)}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right], \quad i=\overline{1, I},$$

где  $\mathbf{Y}_i^*(t_k) = L_i(\mathbf{X}_k^*)$ ,  $\mathbf{X}_k^*$  – оценка вектора состояния  $\mathbf{X}(t)$  в момент времени  $t_k$ , формируемая в результате совместной обработки оценок радионавигационных параметров  $\mathbf{Y}_i^*(t_{k-1}|t_{k-1}+T)$  и выходных данных ИНС;  $R_i(t_k|t_k+T)$  – матрица центральных моментов 2-го порядка ошибок фильтрации компонент вектора  $\mathbf{Y}_i$ ;  $R_k$  – матрица центральных моментов 2-го порядка ошибок фильтрации компонент вектора  $\mathbf{X}$ , которые имеют место в результате совместной обработки наблюдений  $\Xi_{\text{и}}(t_k)$  и  $\mathbf{Y}_i^*(t_{k-1}|t_{k-1}+T)$ ;

$$F_i(t, \mathbf{Y}_{ik}^*) = \mathbf{N}_i^{-1} \left\{ 2\xi_i(t) S_i(t, \mathbf{A}(t, \mathbf{Y}_{ik}^*)) - S_i^2(t, \mathbf{A}(t, \mathbf{Y}_{ik}^*)) \right\};$$

$\Phi_i'(t_k+T)$  и  $\Phi_i''(t_k+T)$  – первая и вторая производные ЛФП соответственно.

Присутствующие в (8) и (9) оценки параметров отказов определяются, как и в случае алгоритмов с совместной первичной обработкой радиосигналов, в



соответствии с правилом (1) на основе апостериорных вероятностей, вычисленных согласно выражению

$$p_i(t_k+T, \lambda_{ki}=r | \mathbf{Y}_{ik}^*) = C p_i(t_k, \lambda_{ki}=r | \mathbf{Y}_{ik}^*) \exp \int_{t_k}^{t_k+T} F_i(t, \mathbf{Y}_{ik}^*, \lambda_{ki}=r) dt, \quad (10)$$

где  $r=0,1$ ;  $C$  – постоянный множитель, определяемый из условия нормировки;

$$p_i(t_k, \lambda_{ki}=r | \mathbf{Y}_k^*) = \sum_{l=0}^1 \pi_{lr}^i p_i(t_{k-1}, \lambda_{ki}=l | \mathbf{Y}_k^*).$$

Рассматривая далее оценки  $\mathbf{Y}_i^*(t_{k-1} | t_{k-1} + T)$  в качестве наблюдений, получим алгоритмы оптимального дискретного оценивания значений компонент вектора состояния  $\mathbf{X}(t)$ . Реализация этих алгоритмов, по сути, является второй ступенью обработки информации.

Если условия применимости метода гауссовской аппроксимации выполняются, то указанные алгоритмы могут быть представлены в виде

$$\mathbf{X}_{k+1}^* = \mathbf{X}_3 + K_{k+1} \begin{bmatrix} \Phi'(t_k+T) \\ \Xi_{k+1}'' - H_{k+1} - \Phi_{Ex} \mathbf{X}_k^* - \Phi_{EE} [\Xi_{k+1}'' - H_k \mathbf{X}_k^*] \end{bmatrix} = \mathbf{X}_3 + K_{k+1} \mathbf{Z}_{k+1}, \quad (11)$$

где  $\Phi'(t_k+T) = [\Phi'_1(t_k+T), \dots, \Phi'_l(t_k+T)]^T$  – значения первых производных ЛФП;  $K_{k+1}$  – матрица оптимальных коэффициентов передачи;  $\mathbf{Z}_{k+1}$  – вектор невязок измерений.

Структурная схема системы, реализующей полученные алгоритмы, представлена на рис. 5. Основными элементами схемы являются: каналы обработки радиосигналов (КОРС1–КОРС $l$ ), блок управления структурой (БУС), блок обработки данных (БОД) и блок обратного преобразования координат (БОПК).

Особенностью данной схемы является отсутствие перекрёстных связей между каналами обработки радиосигналов, но достоинства комплексирования на уровне первичной обработки сохраняются, так как формирование опорных сигналов осуществляется на основе оценок навигационных параметров, являющихся результатом комплексной обработки радионавигационных параметров и выходных данных ИНС на второй ступени обработки.

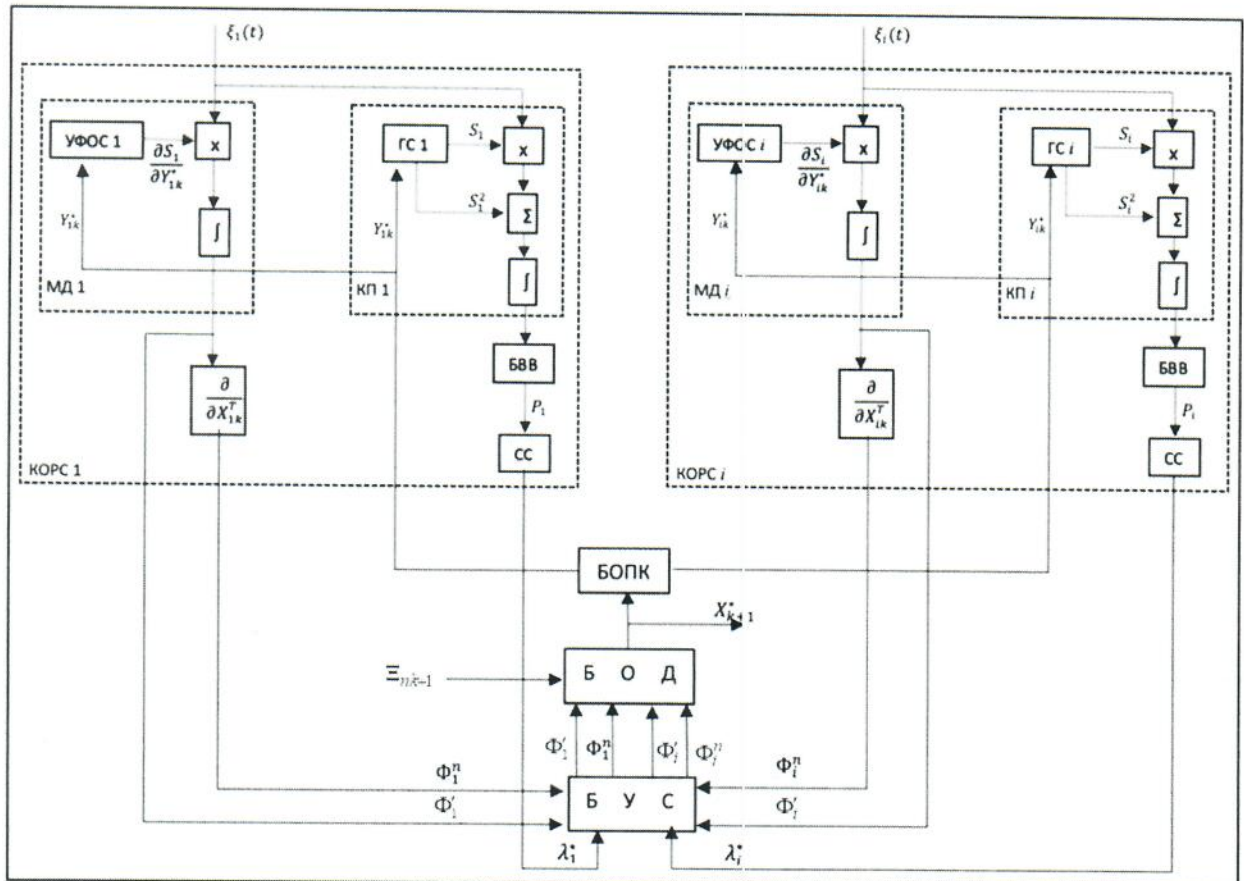


Рис. 5. Структурная схема системы комплексной обработки информации

В третьем разделе проводится анализ потенциально достижимых характеристик качества функционирования бортовой интегрированной системы комплексной обработки информации.

Разработанная методика расчёта потенциальных характеристик точности и помехоустойчивости бортовой интегрированной системы комплексной обработки дискретно-непрерывных, импульсных и дискретных сигналов позволяет количественно оценить СКО ошибок определения основных



навигационных параметров и на основе этого корректно произвести сравнение качества функционирования синтезированной бортовой системы КОИ при различных вариантах конфигурации системы. Кроме этого, результаты расчётов потенциальных характеристик точности и помехоустойчивости дают возможность оценить проигрыш в качестве функционирования при переходе от схемы с совместной первичной обработкой радиосигналов к схеме, реализующей структурно раздельную их обработку.

Анализ полученных результатов по оценке потенциальных характеристик точности и помехоустойчивости бортовой интегрированной системы КОИ ГНСС ГЛОНАСС, БЭЙДОУ и ИНС показал, что использование комплексирования на уровне первичной обработки информации, с учётом имеющейся при этом информационной избыточности, позволяет существенно повысить помехоустойчивость и уменьшить ошибки измерения навигационных параметров. При этом бортовая интегрированная система КОИ, построенная на основе ГНСС ГЛОНАСС, БЭЙДОУ и ИНС, имеет лучшие характеристики точности и помехоустойчивости по сравнению с системой комплексной обработки радиосигналов от минимально необходимого количества НКА ГЛОНАСС и выходных данных ИНС. Например, при  $q_c = 10^{-3}$  (типовой вариант применения ГЛОНАСС) установившиеся значения СКО ошибок оценивания координат составляют 0,4 и 0,68 м, составляющих скорости - 0,029 и 0,036 м/с соответственно для систем КОИ ГЛОНАСС/БЭЙДОУ/ИНС и ГЛОНАСС/ИНС. При уменьшении отношения сигнал/шум от  $q_c = 10^{-3}$  до  $q_c = 10^{-5}$  СКО ошибок оценивания координат и скорости увеличиваются соответственно до 4 м и 0,096 м/с для интегрированной системы ГЛОНАСС/БЭЙДОУ/ИНС и до 6,98 м и 0,12 м/с для системы КОИ ГЛОНАСС/ИНС.

Сравнительный анализ результатов исследования характеристик качества функционирования и вычислительной сложности синтезированных алгоритмов КОИ в бортовой интегрированной системе ГЛОНАСС/БЭЙДОУ/ИНС с совместной и со структурно раздельной первичной обработкой радиосигналов показывает, что, применительно к решению задач повышения качества и

надёжности НВО ВС ГА наиболее приемлемым вариантом обработки информации в бортовой интегрированной АП ГНСС ГЛОНАСС и БЭЙДОУ являются алгоритмы с совместной первичной обработкой радиосигналов, так как подобные алгоритмы оказываются более помехоустойчивыми и обеспечивают лучшие точностные показатели в сложной помеховой обстановке ( $q_c = 10^{-5}$ ), которая в реальных условиях реальной эксплуатации ВС ГА весьма вероятна. СКО ошибок оценивания координат и скорости ЛА при совместной первичной обработке радиосигналов при  $q_c = 10^{-5}$  составляют соответственно 94% и 79% от аналогичных показателей для случая раздельной первичной обработки радиосигналов.

Отмеченные алгоритмы оказываются более надёжными и в случае, когда задача определения координат ЛА осуществляется в условиях манёвренного маловысотного полёта. Их использование снижает вероятность срыва слежения за сигналами ОРНТ и позволяет сократить время поиска сигналов и входа в синхронизм при кратковременных пропаданиях сигналов. Кроме того, алгоритмы с совместной первичной обработкой радиосигналов при обработке избыточных наблюдений требуют значительно меньших вычислительных затрат.

Алгоритмы со структурно раздельной первичной обработкой радиосигналов могут быть рекомендованы для использования в бортовой аппаратуре интегрированных РНС, предназначенной для работы в менее сложной помеховой обстановке, когда требуемый уровень качества функционирования может быть достигнут при использовании меньшего количества ИК. При этом удастся получить АП отличающуюся простотой практической реализации при сравнительно невысоких требованиях к вычислительным возможностям БЦВМ.

**В четвертом разделе** проводится анализ фактически достижимых характеристик качества функционирования бортовой интегрированной системы комплексной обработки информации.



Разработана методика расчета и анализа фактически ожидаемых характеристик качества функционирования (точности и помехоустойчивости) реконфигурируемой системы КОИ в составе бортовой АП интегрированной РНС, построенной на основе СРНС ГЛОНАСС и БЭЙДОУ. Предлагаемая методика основана на применении метода статистического моделирования сигналов на выходах многомерных дискриминаторов. Она позволяет при сравнительно небольших вычислительных затратах исследовать нелинейную статистическую динамику фактических ошибок оценивания и учесть отличие характеристик дискриминаторов от оптимальных. Применение данной методики дает возможность произвести количественное сравнение фактически ожидаемых характеристик точности и помехоустойчивости синтезированной системы КОИ для различных вариантов ее конфигурации и условий применения, оценить обоснованность принятых допущений, а также исследовать степень критичности к отклонениям характеристик и параметров входных воздействий и оцениваемых процессов от расчетных.