

**Г.И. Емельянцев,
А.П. Степанов, А.А. Медведков**

**ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ИНЕРЦИАЛЬНО-
СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И
НАВИГАЦИИ**

Учебно-методическое пособие

**Санкт-Петербург
2018**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Г.И. Емельянцев,

А.П. Степанов, А.А. Медведков

**ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ИНЕРЦИАЛЬНО-
СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И
НАВИГАЦИИ**

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО

по направлению подготовки (специальности)

24.04.02 «Системы управления движением и навигация»

**в качестве учебно-методического пособия для реализации основных профес-
сиональных образовательных программ высшего образования бакалавриата
(магистратуры, специалитета)**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2018

Емельянцев Г.И., Степанов А.П., Медведков А.А. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации. Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторного практикума – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 111 с.

Рецензент: Лопарев Алексей Валерьевич, к.т.н., доцент.

В пособии представлен цикл лабораторных работ по имитационному моделированию алгоритмов функционирования различных интегрированных систем ориентации и навигации с использованием реальных данных. Приводятся основные вопросы теории построения сильносвязанных интегрированных систем ориентации и навигации, методические указания к выполнению лабораторных работ, направленные на освоение и закрепление практических навыков в имитационном моделировании алгоритмов функционирования интегрированных систем ориентации и навигации.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2018

© Г.И. Емельянцев, А.П. Степанов, А.А. Медведков, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ	5
1. ЦЕЛЬ ЦИКЛА ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	6
2. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ПОСТРОЕНИЯ СИЛЬНОСВЯЗАННОЙ ИСОН.....	6
2.1. Алгоритмы совместной обработки с использованием обобщенного фильтра Калмана данных БИИМ и одноантенной ПА СНС при решении навигационной задачи высокоманевренного объекта.....	8
2.2. Алгоритмы совместной обработки с использованием обобщенного фильтра Калмана данных БИИМ и двухантенной ПА СНС при решении задачи ориентации морского объекта.....	15
2.3. Совместная обработка с использованием ФК данных БИИМ, лага и магнитометров при решении задачи ориентации	22
3. ОПИСАНИЕ ИСОН, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТАХ..	26
3.1. Экспериментальный образец ИСОН с высоким уровнем интеграции для высокоманевренных объектов.....	26
3.2. СНС-компас «ИСОН-1».....	30
3.3. СНС-компас «ИСОН-2».....	34
4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ.....	37
4.1. Лабораторная работа № 1. «Исследование алгоритмов работы и анализ точности экспериментального образца ИСОН с БИИМ на ММД, построенной по сильносвязанной схеме в части решения задачи навигации»..	37
4.2. Лабораторная работа № 2 «Исследование алгоритмов работы и анализ точности СНС-компаса «ИСОН-1», построенного по сильносвязанной схеме в части использования фазовых измерений при решении задачи ориентации» ...	41
4.3. Лабораторная работа № 3 "Решение задачи ориентации с использованием магнитометров измерительного блока «ИСОН-2»"	46
5. РУКОВОДСТВО ПО РАБОТЕ С ИМИТАЦИОННЫМИ МОДЕЛЯМИ ИСОН	49
6. МЕТОДИКА ЗАПИСИ И ФОРМИРОВАНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ СНС-КОМПАСОВ «ИСОН-1» И «ИСОН-2»..	54
ЛИТЕРАТУРА.....	108

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

БИИМ – бескарданный инерциальный измерительный модуль;
ВОГ – волоконно-оптический гироскоп;
ГНСС - глобальная навигационная спутниковая система;
ГЛОНАСС – глобальная СНС (Россия);
ГСТ – географический сопровождающий трёхгранник;
ДП – динамические параметры;
ДУС – датчик угловой скорости;
ИБ – измерительный блок;
ИМ – измерительный модуль;
ИИМ – инерциальный измерительный модуль;
ИСК – инерциальная система координат;
ИСОН – интегрированная система ориентации и навигации;
ЛА – линейный акселерометр;
МГХ – массогабаритные характеристики;
ММГ – микромеханический гироскоп;
ММА – микромеханический акселерометр;
ММД – микромеханические датчики;
МПО – морской подвижный объект;
НС – навигационный спутник из наблюдаемой орбитальной группировки;
НП – навигационные параметры;
ОФК – обобщённый фильтр Калмана;
ОГ – опорный генератор;
ПА – приёмная аппаратура;
ПМО – программно-математическое обеспечение;
ППП – пакет прикладных программ;
СК – система координат;
СКО – среднеквадратическое отклонение;
СНС – спутниковая навигационная система;
ССК – связанная (с объектом) система координат;
ФК – фильтр Калмана;
ЧЭ – чувствительные элементы;
ЭО – экспериментальный образец
GPS – глобальная СНС (США);
РС (ПК) – персональный компьютер.

1. ЦЕЛЬ ЦИКЛА ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Цель проведения лабораторных работ заключается:

1) в изучении ИСОН, построенных по сильносвязанной схеме, в том числе их структуры и режимов работы, дискретных алгоритмов интеграции данных БИИМ на ДУС, мультиантенной ПА СНС с фазовыми измерениями, магнитометров и лага с использованием обобщенного фильтра Калмана;

2) в изучении состава, структуры построения и точности интегрированных систем разработки ЦНИИ «Электроприбор»: СНС- компаса «ИСОН-1» и ИИМ на микроэлектромеханических датчиках, включая анализ в пакете MATLAB(Simulink) алгоритмов работы этих систем и характеристик точности с использованием результатов стендовых и мореходных испытаний.

2. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ПОСТРОЕНИЯ СИЛЬНОСВЯЗАННОЙ ИСОН

В рамках настоящего учебного пособия изучаются следующие вопросы:

а) изучение состава и структуры построения ИСОН по сильносвязанной схеме;

б) изучение в рамках построения ИСОН по сильносвязанной схеме дискретных алгоритмов задач интеграции данных БИИМ, мультиантенной ПА СНС с фазовыми измерениями, магнитометров и лага для режимов начальной выставки и калибровки, обсервационного и автономного режимов работы и их особенностей [1,2]:

- формирования разностных измерений и их линеаризация;
- описания вектора состояния, матрицы динамики системы и матрицы измерений;
- ковариационного канала ФК;
- оценочного канала;
- формирования обратных связей.

На рис.2.1 представлена структура ИСОН, построенной по сильносвязанной схеме. На рисунке приняты следующие обозначения: ρ_{i_z} , $\dot{\rho}_{i_z}$ и ρ_{i_pr} , $\dot{\rho}_{i_pr}$ – измеренные и расчётные (приборные) значения дальности и радиальной скорости для каждого НС соответственно; e_{ji} - эфемериды НС; ПО – параметры ориентации; НП - навигационные параметры; $\nabla \vec{f}_b$ – вектор приращений угла поворота блока гироскопов на интервале опроса датчиков; $\nabla \vec{v}_b, \nabla \vec{s}_b$ – векторы приращений линейной скорости и линейного перемещения на интервале опроса акселерометров соответственно; $L_{h,o}$ – кватернион ориентации БИИМ относительно осей географического сопровождающего трёхгранника (ГСТ, ENh), ему соответствует матрица перехода от осей объекта к осям ГСТ (блока БИИМ – $C_{o,h}$) $C_{b,h}$; K, ψ, θ - углы курса, дифферента и крена соответственно. Здесь и далее

индекс "z" означает принадлежность данных к ПА СНС; индекс "pr" – к выходным параметрам ИСОН.

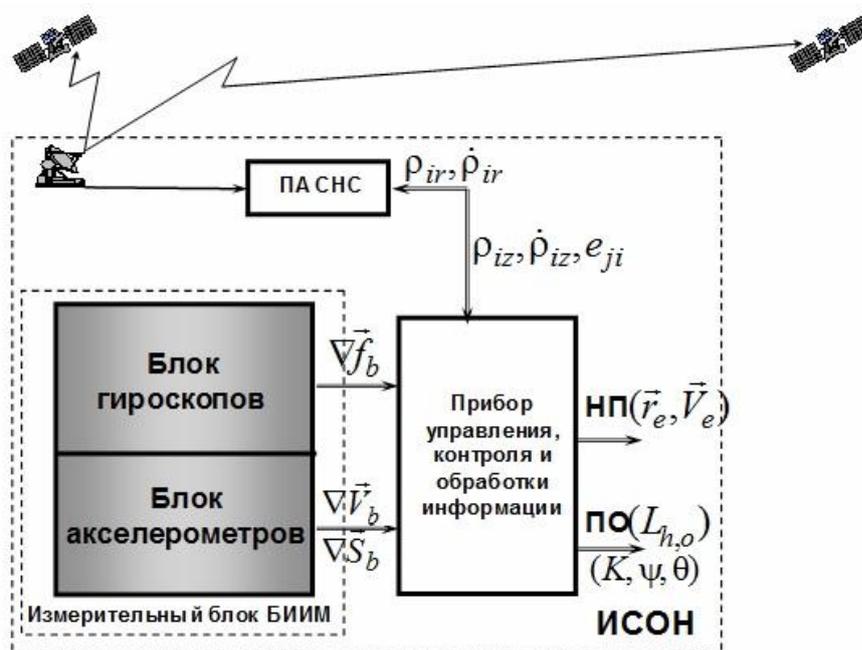


Рис. 2.1. Структурная схема сильносвязанной ИСОН

Анализ схемы рис.2.1 показывает, что имеет место двусторонний обмен данными между ПА СНС и вычислителем ИСОН (прибором управления, контроля и обработки информации). Этот обмен осуществляется на уровне радиальных дальностей (псевдодальностей) и скоростей (псевдоскоростей), и если радиальные псевдоскорости и псевдодальности поступают в вычислитель ИСОН для решения навигационной задачи (определения координат и линейных скоростей центра навигации БИИМ, т.е. точки внутри БИИМ, к которой приводятся центры чувствительных масс акселерометров), то обратный обмен со стороны ИСОН производится с целью поддержки ПА СНС. Передаваемые в ПА СНС данные о радиальных скоростях и дальностях используются в системе слежения за несущей (ССН) частотой в ПА СНС с целью придания ей большей помехоустойчивости в условиях динамики объекта [1,2].

Здесь также следует отметить, что первоначально [11] под сильносвязанной системой подразумевалась именно интегрированная система, где имеет место указанная обратная связь в ССН, при этом не важно, на каком уровне осуществляется совместная обработка данных ПА СНС и БИИМ: готовое навигационное решение или "сырые" данные (радиальные псевдодальности и псевдоскорости). Однако в настоящее время сложилась тенденция к определению сильносвязанной системы как системы, где комплексирование БИИМ и ПА СНС производится именно на уровне "сырых" данных, безотносительно к тому, есть обратная связь в ССН или нет [1,2,11,12].

Следует также упомянуть о том, что расчёт радиальных скоростей и дальностей ИСОН для поддержки ССН в ПА СНС может быть выполнен как в ИСОН, так и в ПА СНС (для этого в ПА СНС необходимо передавать текущие координаты и линейные скорости, вырабатываемые ИСОН). Второй вариант

расчёта радиальных скоростей и дальностей является предпочтительным в силу того, что в ПА СНС такой расчёт будет в большей степени соответствовать текущему моменту времени и текущим НС; кроме того, в этом случае нет необходимости существенно усложнять процесс приёма-передачи данных по соответствующим интерфейсам между БИИМ и ПА СНС.

При построении сильносвязанной ИСОН немаловажными являются вопросы о возможности обработки данных всех видимых НС (all-in-view) и обеспечения контроля целостности радионавигационного поля [1]. В настоящее время разрешение обозначенных вопросов осуществляется следующим образом. При устойчивом одновременном наблюдении значительного числа НС (более 4) решение навигационной задачи ИСОН и контроль целостности возлагается на ПА СНС (где реализуется вторичная обработка данных), т.е. реализуется вариант слабосвязанного комплексирования БИИМ и ПА СНС. В противном случае, когда количество одновременно наблюдаемых НС колеблется в пределах 4, осуществляется переход к схеме сильносвязанного комплексирования [1].

2.1. Алгоритмы совместной обработки с использованием обобщенного фильтра Калмана данных БИИМ и одноантенной ПА СНС при решении навигационной задачи высокоманевренного объекта

Под решением навигационной задачи объекта здесь и далее понимается определение кинематических параметров движения центра навигации БИИМ: его координат и линейных скоростей.

Под высокоманевренными объектами здесь и далее подразумеваются объекты, динамика движения которых (как по угловым перемещениям относительно центра масс, так и перемещения центра масс) не позволяет решить задачу определения кинематических параметров движения таких объектов без принятия специальных мер (построения ИСОН по схеме сильносвязанного комплексирования, организации поддержки ССН и системы поиска сигналов НС в ПА СНС и др.).

Входной информацией алгоритма построения сильносвязанной ИСОН при решении задачи навигации является:

$\rho_{i_z}, \dot{\rho}_{i_z}$ – измеренные значения соответственно дальности и радиальной скорости для каждого НС (относительно фазового центра излучающей антенны НС) из орбитальной группировки (от ПА СНС);

e_{ji} и \dot{e}_{ji} (здесь и далее $j = 1, 2, 3$ – оси принятой инерциальной системы координат (СК)) – эфемеридная информация: значения декартовых координат и составляющих вектора линейной скорости относительно Земли в проекциях на гринвичские оси (оси e_1 и e_2 находятся в плоскости экватора, ось e_3 – направлена по оси Мира) для каждого НС (от ПА СНС) [2];

$e_{j_{pr}}, \dot{e}_{j_{pr}}$ – приборные значения декартовых координат и составляющих вектора относительной линейной скорости объекта (фазового центра приёмной антенны объекта) в гринвичских осях (от БИИМ).

Измеренные значения дальности ρ_{i_z} и радиальной скорости $\dot{\rho}_{i_z}$ для каждого НС из орбитальной группировки ($i=1..10$) формируются с дискретностью $T_z = t_{k+1} - t_k$, где t_k – текущий момент времени, соответствующий k -му шагу поступления измерений ПА СНС:

$$\begin{aligned}\rho_{i_z}(k+1) &= \rho_{i_m}(k+1) + \delta D + \varepsilon_{ei}, \\ \dot{\rho}_{i_z}(k+1) &= \dot{\rho}_{i_m}(k+1) + \delta \dot{D} + \varepsilon_{vi},\end{aligned}\tag{2.1.1}$$

где

$$\rho_{i_m}(k+1) = \sqrt{(e_{1i} - e_{1m})^2 + (e_{2i} - e_{2m})^2 + (e_{3i} - e_{3m})^2},$$

$$\dot{\rho}_{i_m}(k+1) = \frac{1}{\rho_{i_m}} [(e_{1i} - e_{1m})(\dot{e}_{1i} - \dot{e}_{1m}) + (e_{2i} - e_{2m})(\dot{e}_{2i} - \dot{e}_{2m}) + (e_{3i} - e_{3m})(\dot{e}_{3i} - \dot{e}_{3m})] \quad - \quad \text{ИСТИННЫЕ}$$

значения соответственно дальности и радиальной скорости относительно каждого НС;

e_{jm} – декартовы координаты фазового центра приёмной антенны (размещённой на подвижном объекте);

$\delta D, \delta \dot{D}$ – смещения соответственно шкалы времени (в единицах дальности) и частоты опорного генератора (в единицах радиальной скорости) в ПА СНС относительно данных НС;

$\varepsilon_{ei}, \varepsilon_{vi}$ – дискретные белые шумы ПА СНС.

Формирование расчётных значений дальности и радиальной скорости для каждого НС осуществляется по данным БИИМ и эфемеридной информации НС в соответствии со следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}\rho_{i_pr}(k+1) &= \sqrt{(e_{1i} - e_{1_pr})^2 + (e_{2i} - e_{2_pr})^2 + (e_{3i} - e_{3_pr})^2}, \\ \dot{\rho}_{i_pr}(k+1) &= \frac{1}{\rho_{i_pr}} [(e_{1i} - e_{1_pr})(\dot{e}_{1i} - \dot{e}_{1_pr}) + (e_{2i} - e_{2_pr})(\dot{e}_{2i} - \dot{e}_{2_pr}) + \\ &\quad + (e_{3i} - e_{3_pr})(\dot{e}_{3i} - \dot{e}_{3_pr})],\end{aligned}\tag{2.1.2}$$

При формировании расчётных значений (2.1.2) следует иметь в виду, что определяемые ПА СНС псевдодальности и радиальные скорости относятся к месту расположения приёмной антенны ИСОН (а точнее – её фазовому центру). По этой причине при определении расчётных (приборных) значений декартовых координат антенны (по данным БИИМ) необходимо учитывать отстояние антенны от БИИМ. Определить алгоритмы пересчёта координат и линейных скоростей от центра навигации БИИМ к антенне не представляет особых трудностей и читатель может попробовать сделать это самостоятельно, либо обратиться к [1] или материалу лекций.

2.1.1. Формирование разностных измерений и их линеаризация

Формирование разностных измерений по "сырым" данным ПА СНС (при наблюдении ограниченного числа НС) производится в ИСОН исходя из следующих соотношений:

$$\begin{aligned}z_{\rho i}(k+1) &= \rho_{i_pr}(k+1) - \rho_{i_z}(k+1); \\ z_{\dot{\rho} i}(k+1) &= \dot{\rho}_{i_pr}(k+1) - \dot{\rho}_{i_z}(k+1);\end{aligned}\tag{2.1.3}$$

Полагая, что погрешности БИИМ являются малыми величинами по сравнению с расстоянием от объекта до НС [1,2], получим

$$\begin{aligned}
\rho_{i_pr}(k+1) &= \rho_{i_m}(k+1) + \Delta\rho_{i_pr} = \\
&= \rho_{i_m}(k+1) + \frac{\partial\rho_{i_pr}}{\partial e_{1_pr}}(k+1) \cdot \Delta e_{1_pr} + \frac{\partial\rho_{i_pr}}{\partial e_{2_pr}}(k+1) \cdot \Delta e_{2_pr} + \frac{\partial\rho_{i_pr}}{\partial e_{3_pr}}(k+1) \cdot \Delta e_{3_pr}, \\
\dot{\rho}_{i_pr}(k+1) &= \dot{\rho}_{i_m}(k+1) + \Delta\dot{\rho}_{i_pr} = \\
&= \dot{\rho}_{i_m}(k+1) + \frac{\partial\dot{\rho}_{i_pr}}{\partial e_{1_pr}}(k+1) \cdot \Delta e_{1_pr} + \frac{\partial\dot{\rho}_{i_pr}}{\partial e_{2_pr}}(k+1) \cdot \Delta e_{2_pr} + \frac{\partial\dot{\rho}_{i_pr}}{\partial e_{3_pr}}(k+1) \cdot \Delta e_{3_pr} + (2.1.4) \\
&+ \frac{\partial\dot{\rho}_{i_pr}}{\partial \dot{e}_{1_pr}}(k+1) \cdot \Delta \dot{e}_{1_pr} + \frac{\partial\dot{\rho}_{i_pr}}{\partial \dot{e}_{2_pr}}(k+1) \cdot \Delta \dot{e}_{2_pr} + \frac{\partial\dot{\rho}_{i_pr}}{\partial \dot{e}_{3_pr}}(k+1) \cdot \Delta \dot{e}_{3_pr},
\end{aligned}$$

где $\Delta e_{j_pr}, \Delta \dot{e}_{j_pr} (j=1,2,3)$ – погрешности БИИМ в выработке декартовых координат и составляющих вектора относительной линейной скорости объекта в проекциях на гринвичские оси.

Тогда

$$\begin{aligned}
z_{\rho i}(k+1) &= \sum_{j=1}^3 \frac{\partial\rho_{i_pr}}{\partial e_{j_pr}}(k+1) \cdot \Delta e_{j_pr} - \delta D + \varepsilon_{ei}, \\
z_{\dot{\rho} i}(k+1) &= \sum_{j=1}^3 \frac{\partial\dot{\rho}_{i_pr}}{\partial e_{j_pr}}(k+1) \cdot \Delta e_{j_pr} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial\dot{\rho}_{i_pr}}{\partial \dot{e}_{j_pr}}(k+1) \cdot \Delta \dot{e}_{j_pr} - \delta \dot{D} + \varepsilon_{vi}, (2.1.5)
\end{aligned}$$

где для частных производных имеют место следующие выражения [1,2]:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial\rho_{i_pr}}{\partial e_{j_pr}}(k+1) &= -\frac{e_{ji} - e_{j_pr}}{\rho_{i_pr}}, \\
\frac{\partial\dot{\rho}_{i_pr}}{\partial e_{j_pr}}(k+1) &= \frac{\dot{\rho}_{i_pr}}{\rho_{i_pr}^2} (e_{ji} - e_{j_pr}) - \frac{1}{\rho_{i_pr}} (\dot{e}_{ji} - \dot{e}_{j_pr}), \\
\frac{\partial\dot{\rho}_{i_pr}}{\partial \dot{e}_{j_pr}}(k+1) &= -\frac{e_{ji} - e_{j_pr}}{\rho_{i_pr}}, \quad j = 1,2,3. (2.1.6)
\end{aligned}$$

Погрешности $\Delta e_{j_pr}, \Delta \dot{e}_{j_pr} (j=1,2,3)$ БИИМ могут быть представлены через погрешности $\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h$ выработки географических координат места φ, λ, h и погрешности $\Delta V_E, \Delta V_N, \Delta V_h$ в выработке составляющих вектора относительной линейной скорости объекта в проекциях на географические оси (правый ортогональный трёхгранник ENh с географической ориентацией осей, где ось h направлена вверх по вертикали места)

$$\begin{aligned}
\Delta e_{1_pr} &= f_{e1_φ} \cdot \Delta\varphi + f_{e1_λ} \cdot \Delta\lambda + f_{e1_h} \cdot \Delta h, \\
\Delta e_{2_pr} &= f_{e2_φ} \cdot \Delta\varphi + f_{e2_λ} \cdot \Delta\lambda + f_{e2_h} \cdot \Delta h, (2.1.7) \\
\Delta e_{3_pr} &= f_{e3_φ} \cdot \Delta\varphi + f_{e3_h} \cdot \Delta h, \\
\Delta \dot{e}_{1_pr} &= f_{\dot{e}1_V_E} \cdot \Delta V_E + f_{\dot{e}1_V_N} \cdot \Delta V_N + f_{\dot{e}1_V_h} \cdot \Delta V_h + f_{\dot{e}1_φ} \cdot \Delta\varphi + f_{\dot{e}1_λ} \cdot \Delta\lambda + f_{\dot{e}1_h} \cdot \Delta h, \\
\Delta \dot{e}_{2_pr} &= f_{\dot{e}2_V_E} \cdot \Delta V_E + f_{\dot{e}2_V_N} \cdot \Delta V_N + f_{\dot{e}2_V_h} \cdot \Delta V_h + f_{\dot{e}2_φ} \cdot \Delta\varphi + f_{\dot{e}2_λ} \cdot \Delta\lambda + f_{\dot{e}2_h} \cdot \Delta h, \\
\Delta \dot{e}_{3_pr} &= f_{\dot{e}3_V_E} \cdot \Delta V_E + f_{\dot{e}3_V_N} \cdot \Delta V_N + f_{\dot{e}3_V_h} \cdot \Delta V_h + f_{\dot{e}3_φ} \cdot \Delta\varphi + f_{\dot{e}3_λ} \cdot \Delta\lambda + f_{\dot{e}3_h} \cdot \Delta h,
\end{aligned}$$

Где $f_{ej_φ}$, $f_{ej_λ}$, f_{ej_h} – соответствующие функции связи между Δe_{j_pr} ($j=1,2,3$) и $\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h$, имеющие вид:

$$\begin{aligned}
 f_{e1_φ} &= -R_\lambda \sin \varphi \cos \lambda; \\
 f_{e1_λ} &= -R_\lambda \cos \varphi \sin \lambda; \\
 f_{e1_h} &= \cos \varphi \cos \lambda; \\
 f_{e2_φ} &= -R_\lambda \sin \varphi \sin \lambda; \\
 f_{e2_λ} &= R_\lambda \cos \varphi \cos \lambda; \\
 f_{e2_h} &= \cos \varphi \sin \lambda; \\
 f_{e3_φ} &= R_\lambda \cos \varphi; \\
 f_{e3_h} &= \sin \varphi;
 \end{aligned} \tag{2.1.8}$$

$f_{\dot{e}j_V_E}$, $f_{\dot{e}j_V_N}$, $f_{\dot{e}j_V_h}$, $f_{\dot{e}j_φ}$, $f_{\dot{e}j_λ}$, $f_{\dot{e}j_h}$ – соответствующие функции связи между $\Delta \dot{e}_{j_pr}$ ($j=1,2,3$) и $\Delta V_E, \Delta V_N, \Delta V_h$, $\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h$, имеющие вид:

$$\begin{aligned}
 f_{\dot{e}1_V_E} &= -\sin \lambda; \\
 f_{\dot{e}1_V_N} &= -\sin \varphi \cos \lambda; \\
 f_{\dot{e}1_V_h} &= \cos \varphi \cos \lambda; \\
 f_{\dot{e}1_φ} &= (-V_N \cos \varphi \cos \lambda - V_h \sin \varphi \cos \lambda); \\
 f_{\dot{e}1_λ} &= (-V_E \cos \lambda + V_N \sin \varphi \sin \lambda - V_h \cos \varphi \sin \lambda); \\
 f_{\dot{e}1_h} &= 0; \\
 f_{\dot{e}2_V_E} &= \cos \lambda; \\
 f_{\dot{e}2_V_N} &= -\sin \varphi \sin \lambda; \\
 f_{\dot{e}2_V_h} &= \cos \varphi \sin \lambda; \\
 f_{\dot{e}2_φ} &= (-V_N \cos \varphi \sin \lambda - V_h \sin \varphi \sin \lambda); \\
 f_{\dot{e}2_λ} &= (-V_E \sin \lambda - V_N \sin \varphi \cos \lambda + V_h \cos \varphi \cos \lambda); \\
 f_{\dot{e}2_h} &= 0; \\
 f_{\dot{e}3_V_E} &= 0; \\
 f_{\dot{e}3_V_N} &= \cos \varphi; \\
 f_{\dot{e}3_V_h} &= \sin \varphi; \\
 f_{\dot{e}3_φ} &= (-V_N \sin \varphi + V_h \cos \varphi); \\
 f_{\dot{e}3_λ} &= 0; \\
 f_{\dot{e}3_h} &= 0.
 \end{aligned} \tag{2.1.9}$$

2.1.2. Расчётная модель погрешностей

При формировании расчётной модели погрешностей ИСОН используются следующие аппроксимации:

- смещения нулей гироскопов $\Delta \bar{\omega}_i$ ($i = xb, yb, zb$) и акселерометров $\Delta \bar{a}_i$, изменения систематических составляющих погрешностей масштабных коэффициентов

ΔM_{gi} ВОГ или ММГ и акселерометров ΔM_{ai} от пуска к пуску и их изменчивость в пуске аппроксимируются (из-за отсутствия достоверных данных об их спектральном составе) соответствующими винеровскими процессами [1, 13];

- погрешности $\delta D, \delta \dot{D}$ ПА СНС представляются следующей линейной непрерывной моделью [1]:

$$d(\delta D)/dt = \delta \dot{D} + w_1, \quad d(\delta \dot{D})/dt = k_2 + w_2,$$

где коэффициент k_2 , характеризующий дрейф частоты опорного генератора, был аппроксимирован соответствующим винеровским процессом [13]; w_1, w_2 – соответствующие белозумные составляющие;

Отметим, что при формировании модели погрешностей "сырых" данных ПА СНС с учётом модели погрешностей опорного генератора (ОГ) следует учитывать её адекватность реальным погрешностям ПА СНС. Так, в ПА СНС может осуществляться периодическая коррекция составляющих погрешностей "сырых" данных из-за дрейфа ОГ, проводимая по результатам определения временных поправок в ходе получения навигационно-временного решения (при вторичной обработке данных ПА СНС [1]). Наличие такой коррекции (отключение которой доступно в современных ПА СНС посредством соответствующих команд) приводит к "пилообразному" кусочно-непрерывному изменению соответствующих составляющих погрешностей "сырых" данных, что не соответствует той модели, которая приведена ранее для $\delta D, \delta \dot{D}$. Далее будем полагать, что коррекция ("подбой") составляющих погрешности ОГ в "сырых" измерениях в ПА СНС не производится;

- шумы $\varepsilon_{ei}, \varepsilon_{vi}$ ПА СНС на частоте $1/T_z$ аппроксимированы дискретными белыми шумами с известными дисперсиями (матрица ковариаций R_k).

Расчётная модель погрешностей ИСОН может быть представлена в векторно-матричной форме:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \Phi_{k+1/k} \cdot x_k + \Gamma_{k+1} \cdot w_k, \\ z_{k+1} &= H_{k+1} \cdot x_{k+1} + v_{k+1}, \end{aligned} \quad (2.1.10)$$

где x_k – вектор состояния системы;

w_k – вектор порождающих дискретных белых шумов с диагональной матрицей ковариаций Q_k , включающей в себя дисперсии компонент вектора w_k ;

z_k – вектор измерений;

v_k – вектор шумов измерений с ковариацией R_k ;

$\Phi_{k+1/k}$ – переходная матрица от k -го к $(k+1)$ -му шагу в соответствии с интервалом получения измерений T_z ;

$\Gamma_{k+1} \cong \Phi_{k+1/k} \cdot T_z$ – матрица возмущений;

H_{k+1} – матрица измерений.

Вектор x имеет структуру

$$x^T = \begin{bmatrix} \alpha & \beta & \gamma & \Delta V_E & \Delta V_N & \Delta V_h & \Delta \varphi & \Delta \lambda & \Delta h & \Delta \bar{\omega}_{xb} & \Delta \bar{\omega}_{yb} & \Delta \bar{\omega}_{zb} & \Delta \bar{a}_{xb} & \Delta \bar{a}_{yb} & \Delta \bar{a}_{zb} \\ \Delta M_{gx} & \Delta M_{gy} & \Delta M_{gz} & \Delta M_{ax} & \Delta M_{ay} & \Delta M_{az} & \delta D & \delta \dot{D} & k_2 & & & & & & \end{bmatrix}$$

где α, β, γ – погрешности определения углов ориентации (α – по курсу, β, γ – в моделировании вертикали места) в построении географического сопровождающего трехгранника ENh .

Здесь следует отметить, что при использовании спутниковой аппаратуры, позволяющей работать с данными различных ГНСС (ГЛОНАСС, GPS и др.) и необходимости достижения высоких точностей решения навигационной задачи в векторе состояния интегрированной системы следует учесть погрешности, обусловленные различием системных шкал времени разных ГНСС.

Матрица $\Phi_{k+1/k}$ может быть получена дискретизацией непрерывной модели динамики [1] с шагом $dT < T_z$, в которой ненулевые элементы матрицы динамики $F = \|f_{i,j}\|$ определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} f_{1,2} &= -f_{2,1} = \omega_N; \\ f_{1,4} &= \frac{1}{R_\lambda} \operatorname{tg} \varphi; f_{1,7} = \Omega_e \cos \varphi + \frac{V_E}{R_\lambda \cos^2 \varphi}; f_{1,10} = c31; f_{1,11} = c32; f_{1,12} = c33; \\ f_{1,16} &= \omega_{xb} c31; f_{1,17} = \omega_{yb} c32; f_{1,18} = \omega_{zb} c33; \\ f_{2,3} &= -f_{3,2} = \omega_h; f_{2,5} = -f_{7,5} = -\frac{1}{R_\varphi}; f_{2,10} = c11; f_{2,11} = c12; f_{2,12} = c13; \\ f_{2,16} &= \omega_{xb} c11; f_{2,17} = \omega_{yb} c12; f_{2,18} = \omega_{zb} c13; \\ f_{3,1} &= -f_{1,3} = \omega_E; f_{3,4} = \frac{1}{R_\lambda}; f_{3,7} = -\Omega_e \sin \varphi; f_{3,10} = c21; f_{3,11} = c22; f_{3,12} = c23; \\ f_{3,16} &= \omega_{xb} c21; f_{3,17} = \omega_{yb} c22; f_{3,18} = \omega_{zb} c23; \\ f_{4,1} &= -f_{6,2} = n_N; f_{4,5} = (2\Omega_e + \dot{\lambda}) \sin \varphi; f_{4,6} = -(2\Omega_e + \dot{\lambda}) \cos \varphi; \\ f_{4,13} &= c11; f_{4,14} = c12; f_{4,15} = c13; f_{4,19} = n_{xb} c11; f_{4,20} = n_{yb} c12; f_{4,21} = n_{zb} c13; \\ f_{5,2} &= -f_{4,3} = n_h; f_{5,4} = -(2\Omega_e + \dot{\lambda}) \sin \varphi; \\ f_{5,13} &= c21; f_{5,14} = c22; f_{5,15} = c23; f_{5,19} = n_{xb} c21; f_{5,20} = n_{yb} c22; f_{5,21} = n_{zb} c23; \\ f_{6,3} &= -f_{5,1} = n_E; f_{6,4} = (2\Omega_e + \dot{\lambda}) \cos \varphi; \\ f_{6,13} &= c31; f_{6,14} = c32; f_{6,15} = c33; f_{6,19} = n_{xb} c31; f_{6,20} = n_{yb} c32; f_{6,21} = n_{zb} c33; \\ f_{8,4} &= \frac{1}{R_\lambda \cos \varphi}; f_{8,7} = \frac{V_E \sin \varphi}{R_\lambda \cos^2 \varphi}; f_{9,6} = 1; \\ f_{22,23} &= 1; f_{23,24} = 1; \end{aligned} \tag{2.1.11}$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$\omega_E, \omega_N, \omega_h$ – угловые скорости движения ГСТ в инерциальном пространстве [1], вырабатываемые ИСОН;

V_E, V_N, V_h – линейные скорости движения БИИМ, вырабатываемые ИСОН;

n_E, n_N, n_h – кажущееся ускорение БИИМ, вырабатываемые ИСОН в осях ГСТ;

$R_{\varphi,\lambda}$ – радиусы кривизны принятого эллипсоида в плоскости меридиана и первого вертикала соответственно;

Ω_e – угловая скорость суточного вращения Земли;

c_{ij} – элементы матрицы $C_{b,h}$, определяющей взаимную ориентацию связанной (в осях БИИМ) и географической (в осях ГСТ) систем координат и рассчитываемой по приборным значениям углов Эйлера-Крылова, полученным из уравнений идеальной работы инерциальной системы [1,10];

$\omega_{xb}, \omega_{yb}, \omega_{zb}$ – угловые скорости движения БИИМ, определяемые по данным гироскопов;

n_{xb}, n_{yb}, n_{zb} – кажущиеся ускорения в осях БИИМ, определяемые по данным акселерометров.

Искомая переходная матрица может быть получена как

$$\Phi_{k+1/k} = \Phi_l \cdot \Phi_{l-1} \cdot \dots \cdot \Phi_1, \quad l = T_z / dT,$$

где $\Phi_{i+1} \cong E_{n \times n} + F(t_k + i \cdot dT) \cdot dT + \frac{1}{2} \mathbf{F}(t_k + i \cdot dT) \cdot dT^2, \quad i = 0, \dots, l-1;$

$E_{n \times n}$ – единичная матрица размерности 24×24 ($n = 24$).

Для получения текущих оценок вектора состояния используется алгоритм обобщенного ФК. На каждом шаге фильтрации производится обработка измерений псевдодальности и псевдоскорости для каждого из N наблюдаемых НС, а также измерения курса внешней системой курсоуказания. Таким образом, матрица H_{k+1} имеет размерность $((2N+1) \times 24)$. При реализации ФК целесообразно использовать алгоритм последовательной обработки измерений по каждому НС [14], при котором коррекция ковариационного канала также производится последовательно. На каждом шаге обработки матрица измерений $[H_{li,j}], \quad l = 1; 2,$ имеет размерность 2×24 , а её ненулевые члены формируются следующим образом (здесь индексы i, j соответствуют измерениям дальности и скорости):

$$H_{li,7} = \left[\frac{\partial p_{i-pr}}{\partial e_{1-pr}} f_{e1-\varphi} + \frac{\partial p_{i-pr}}{\partial e_{2-pr}} f_{e2-\varphi} + \frac{\partial p_{i-pr}}{\partial e_{3-pr}} f_{e3-\varphi} \right];$$

$$H_{li,8} = \left[\frac{\partial p_{i-pr}}{\partial e_{1-pr}} f_{e1-\lambda} + \frac{\partial p_{i-pr}}{\partial e_{2-pr}} f_{e2-\lambda} \right];$$

$$H_{li,9} = \left[\frac{\partial p_{i-pr}}{\partial e_{1-pr}} f_{e1-h} + \frac{\partial p_{i-pr}}{\partial e_{2-pr}} f_{e2-h} + \frac{\partial p_{i-pr}}{\partial e_{3-pr}} f_{e3-h} \right];$$

$$H_{li,22} = -1;$$

$$H_{2i,4} = \left[\frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial \dot{e}_{1-pr}} f_{\dot{e}1-V_E} + \frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial \dot{e}_{2-pr}} f_{\dot{e}2-V_E} \right];$$

$$H_{2i,5} = \left[\frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial \dot{e}_{1-pr}} f_{\dot{e}1-V_N} + \frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial \dot{e}_{2-pr}} f_{\dot{e}2-V_N} + \frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial \dot{e}_{3-pr}} f_{\dot{e}3-V_N} \right];$$

$$H_{2i,6} = \left[\frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial \dot{e}_{1-pr}} f_{\dot{e}1-V_h} + \frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial \dot{e}_{2-pr}} f_{\dot{e}2-V_h} + \frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial \dot{e}_{3-pr}} f_{\dot{e}3-V_h} \right];$$

$$\begin{aligned}
H_{2i,7} &= \left\{ \left[\frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial e_{1-pr}} f_{e1-\varphi} + \frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial e_{2-pr}} f_{e2-\varphi} + \frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial e_{3-pr}} f_{e3-\varphi} \right] + \left[\frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial \dot{e}_{1-pr}} f_{\dot{e}1-\varphi} + \frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial \dot{e}_{2-pr}} f_{\dot{e}2-\varphi} + \frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial \dot{e}_{3-pr}} f_{\dot{e}3-\varphi} \right] \right\}; \\
H_{2i,8} &= \left\{ \left[\frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial e_{1-pr}} f_{e1-\lambda} + \frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial e_{2-pr}} f_{e2-\lambda} \right] + \left[\frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial \dot{e}_{1-pr}} f_{\dot{e}1-\lambda} + \frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial \dot{e}_{2-pr}} f_{\dot{e}2-\lambda} \right] \right\}; \\
H_{2i,9} &= \left\{ \left[\frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial e_{1-pr}} f_{e1-h} + \frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial e_{2-pr}} f_{e2-h} + \frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial e_{3-pr}} f_{e3-h} \right] + \left[\frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial \dot{e}_{1-pr}} f_{\dot{e}1-h} + \frac{\partial \dot{p}_{i-pr}}{\partial \dot{e}_{2-pr}} f_{\dot{e}2-h} \right] \right\}; \\
H_{2i,23} &= -1.
\end{aligned} \tag{2.1.12}$$

Ковариационный канал ФК формируется исходя из следующих соотношений:

$$\begin{aligned}
P_{k/k+1} &= \Phi_{k/k+1} P_k \Phi_{k/k+1}^T + \Gamma_{k/k+1} Q_k \Gamma_{k/k+1}^T, \\
K_{k+1} &= P_{k/k+1} H_{k+1}^T [H_{k+1} P_{k/k+1} H_{k+1}^T + R_{k+1}]^{-1}, \\
P_{k+1} &= [E_{n \times n} - K_{k+1} H_{k+1}] P_{k/k+1} [E_{n \times n} - K_{k+1} H_{k+1}]^T + K_{k+1} R_{k+1} K_{k+1}^T,
\end{aligned} \tag{2.1.13}$$

где K_{k+1} – матричный коэффициент усиления задачи калмановской фильтрации [1].

Оценочный канал ФК формируется в соответствии с соотношениями

$$\xi_{k+1} = C \Phi_{k/k+1} C \xi_k + K_{k+1} z_{k+1}, \tag{2.1.14}$$

$$C = \text{diag}(\underbrace{0 \ 0 \ \dots \ 0}_9 \ \underbrace{1 \ 1 \ \dots \ 1}_{15}). \tag{2.1.15}$$

При этом оценки первых 9 элементов вектора состояния (параметров ориентации, составляющих вектора линейной скорости и координат места) на каждом шаге получения измерений (с интервалом T_z) подаются в обратной связи на входы соответствующих интеграторов, реализующих интегрирование угловых скоростей и линейных ускорений, измеряемых инерциальными датчиками (см. рис. 6.2 – группа №2), и «списываются» к моменту получения нового измерения. Для обеспечения «гладкости» выходных данных ИСОН значения оценок на каждом шаге интегрирования (с интервалом dT) поступают с весом dT/T_z .

Оценки остальных 15 элементов вектора состояния (дрейфов гироскопов, погрешностей масштабных коэффициентов гироскопов и акселерометров, а также погрешностей опорного генератора ПА СНС) на каждом шаге получения измерений используются для коррекции выходных сигналов соответствующих датчиков.

2.2. Алгоритмы совместной обработки с использованием обобщенного фильтра Калмана данных БИИМ и двухантенной ПА СНС при решении задачи ориентации морского объекта

Под решением задачи ориентации объекта здесь и далее понимается определение кинематических параметров его движения вокруг центра навигации БИИМ: углов курса и качки (либо соответствующей матрицы или кватерниона ориентации).

2.2.1. Формирование разностных измерений

Алгоритмическое обеспечение задачи совместной обработки навигационных данных (при наблюдении более 4 НС) в современных интегрированных системах включает формирование следующих разностных измерений:

- скоростных и позиционных измерений с опорой на данные ПА СНС:
 - при построении ИСОН в части решения навигационной задачи по слабосвязанной схеме (что соответствует системе «ИСОН-1», рис.2.2):

$$\begin{aligned} z_{V_j} &= V_{j_pr}(t_{k+1}) - V_{j_z}(t_{k+1}), \quad (j = E, N, h) \\ z_{\varphi}(t_{k+1}) &= \varphi_{pr}(t_{k+1}) - \varphi_z(t_{k+1}), \\ z_{\lambda}(t_{k+1}) &= \lambda_{pr}(t_{k+1}) - \lambda_z(t_{k+1}), \\ z_h(t_{k+1}) &= h_{pr}(t_{k+1}) - h_z(t_{k+1}); \end{aligned} \quad (2.2.1)$$

- при построении ИСОН в части решения навигационной задачи по сильносвязанной схеме:

$$\begin{aligned} z_{\dot{\rho}_i} &= \dot{\rho}_{i_pr}(t_{k+1}) - \dot{\rho}_{i_z}(t_{k+1}), \\ z_{\rho_i}(t_{k+1}) &= \rho_{i_pr}(t_{k+1}) - \rho_{i_z}(t_{k+1}), \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

где расчётные (pr) значения параметров формируются с использованием данных БИИМ, а измеренные (z) – ПА СНС;

- фазовых измерений путём сравнения расчётных $\nabla s_{i,i+1}^{bl(R)}$ (по данным БИИМ и эфемерид НС) и измеренных $\nabla s_{i,i+1}^{bl(z)}$ (по данным приемников СНС от разнесённых на определённой базе антенн) значений вторых разностей фазовых измерений

$$z_{i,i+1}^{bl} = \nabla s_{i,i+1}^{bl(R)} - \nabla s_{i,i+1}^{bl(z)}, \quad (2.2.3)$$

где в разностях присутствуют с соответствующими весами погрешности решения в БИИМ задачи ориентации объекта, неоднозначности вторых разностей фазовых измерений, погрешности ориентации базы в осях объекта и шумы измерений (см. далее п.2.2.2);

- скоростных измерений с опорой на данные относительного лага

$$\begin{aligned} z_{V_E^L} &= V_{E_pr} - V_L \sin K \cong \Delta V_E - V_N \alpha + v_{V_E}, \\ z_{V_N^L} &= V_{N_pr} - V_L \cos K \cong \Delta V_N + V_E \alpha + v_{V_N}, \end{aligned} \quad (2.2.4)$$

где V_L – показания лага (продольной составляющей скорости движения объекта относительно воды); v_{V_i} ($i = E, N$) – погрешности измерений, включающие морские течения, неизмеряемую поперечную составляющую вектора линейной скорости судна и инструментальные погрешности лага;

- дополнительного курсового измерения, которое используется в качестве резервного при отказе ПА СНС и которое приближенно может быть представлено в виде

$$z_{MK} = K - K_{mk} \cong \alpha - \Delta\bar{K}_{mk} + \delta K_{mk}, \quad (2.2.5)$$

где K_{mk} – курс магнитный, формируемый по данным блока магнитометров; $\Delta\bar{K}_{mk}$, δK_{mk} – соответственно систематическая и флюктуационная погрешности магнитного курса.

При формировании измерений (2.2.1)-(2.2.3) и (2.2.5) следует иметь в виду, что определяемые ПА СНС координаты места и линейные скорости, а также псевдодальности и радиальные скорости относятся к месту расположения приёмной антенны ИСОН (точнее – к её фазовому центру). В связи с этим при определении расчётных (приборных) значений указанных параметров (определяемых по данным БИИМ) необходимо учитывать отстояние антенны от БИИМ. Определить соответствующие алгоритмы пересчёта от центра навигации БИИМ к антенне не представляет особых трудностей и, как и в п.2.1, читатель может попробовать сделать это самостоятельно, либо обратиться к [1] или материалу лекций. В случае формирования измерений по данным относительного лага такого согласования, как правило, не требуется в силу значительных погрешностей лага, а также с учётом возможного сглаживания его показаний.

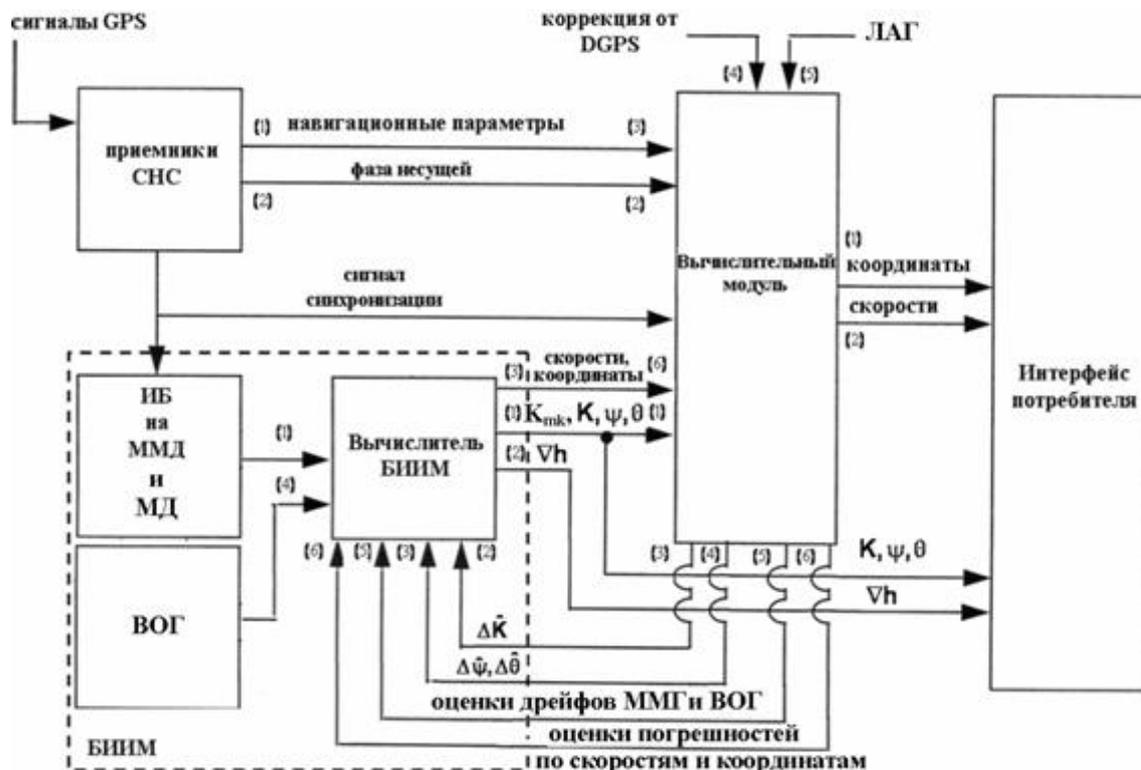


Рис. 2.2. Блок-схема интегрированной системы «ИСОН-1»

На рисунке приняты следующие обозначения: ИБ на ММД и МД – измерительный блок на микромеханических датчиках и магнитометрах, входящий в состав БИИМ; K - курс, K_{mk} - курс магнитный, ψ, θ - углы качки; ∇h - вертикальные перемещения судна; $\Delta\bar{K}, \Delta\bar{\psi}, \Delta\bar{\theta}$ - оценки погрешностей опреде-

ления курса и углов качки соответственно; DGPS – поправки в дифференциальном режиме ПА СНС. Более подробно с терминологией, приведённой на рис.2.2, можно ознакомиться в [1,2,3,11])

Скоростные и позиционные измерения (2.2.1) или (2.2.2) используются как при запуске системы, так и в процессе плавания для оценки и коррекции погрешностей БИИМ по курсу, углам качки и навигационным параметрам, также для калибровки дрейфов гироскопов и погрешностей акселерометров инерциального модуля в условиях отсутствия «сбоев» ПА СНС и видимости НС. Уравнения формирующего фильтра задачи фильтрации системы приведены далее.

При отсутствии данных от ПА СНС работа ИСОН осуществляется в автономном режиме с использованием измерений (2.2.4), а также для удержания погрешности по курсу в требуемых пределах в качестве резервного источника данных используются измерения по данным магнитного компаса – (2.2.5).

2.2.2. Формирование фазовых измерений и их линеаризация

Для вторых разностей определённых в ПА СНС значений фазовых измерений дальностей от НС до антенн приёмников СНС (разности между первыми разностями фазовых измерений дальностей, относящиеся к одному моменту времени, но к разным НС [1,3]), имеем

$$\nabla s_{i,i+1}^{bl(z)} = s_{i+1}^{bl(z)} - s_i^{bl(z)}, \quad (2.2.6)$$

где $s_i^{bl(z)}$ – вычисленное в ИСОН по измерениям разности фаз сигнала НС на разнесённые антенны (опорную антенну A_{on} и отнесенную A_i) значение направляющего косинуса орта \vec{s}_i (задающего направление на НС) относительно базы \vec{b}_1 [1].

При этом используется распространённый способ формирования вторых разностей, когда выбирается основной (опорный) НС, близкий к зениту, первые разности измерений для которого вычитаются из первых разностей измерений для остальных наблюдаемых НС [1,3].

Располагая декартовыми координатами $\{e_{1pr}; e_{2pr}; e_{3pr}\}$ точки размещения на объекте опорной A_{on} антенны в гринвичской системе координат, параметрами ориентации объекта от БИИМ (матрицей направляющих косинусов - C_{o,h_pr}), а также известными эфемеридными $\{e_{1i}; e_{2i}; e_{3i}\}$ НС от ПА СНС, можно рассчитать направляющие косинусы орта \vec{s}_i :

- в гринвичских осях

$$\vec{s}_{ie_pr} = \frac{1}{\sqrt{(e_{1i} - e_{1pr})^2 + (e_{2i} - e_{2pr})^2 + (e_{3i} - e_{3pr})^2}} \begin{bmatrix} e_{1i} - e_{1pr} \\ e_{2i} - e_{2pr} \\ e_{3i} - e_{3pr} \end{bmatrix};$$

- в географических осях

$$\vec{s}_{hi_pr} = C_{e,h} \cdot \vec{s}_{ie_pr},$$

где $C_{e,h}(\lambda, \varphi)$ – матрица перехода от гринвичских к географическим осям [10];
 - в связанных с объектом осях

$$\vec{s}_{io} = (C_{o,h_pr})^T \cdot \vec{s}_{ih_pr} \quad (2.2.7)$$

Отсюда может быть сформировано расчётное значение направляющего косинуса орта \vec{s}_i направления на i -й НС относительно базы \vec{b}_1 :

$$s_i^{bl(R)} = (\vec{b}_{1o}^{ort})^T \cdot \vec{s}_{io_pr} \quad (2.2.8)$$

где \vec{b}_{1o}^{ort} – вектор направляющих косинусов, определяющих взаимную ориентацию системы координат, связанной с объектом, и вектора антенной базы.

Соответственно для вторых разностей расчетных значений фазовых измерений получим

$$\nabla s_{i,i+1}^{bl(R)} = s_{i+1}^{bl(R)} - s_i^{bl(R)} \quad (2.2.9)$$

По расчётным и измеренным значениям вторых разностей фазовых измерений формируются искомые разностные измерения

$$Z_{i,i+1}^{bl} = \nabla s_{i,i+1}^{bl(R)} - \nabla s_{i,i+1}^{bl(z)} \quad (2.2.10)$$

которые содержат:

- погрешности $\Delta C_{o,h_pr}$ определения элементов матрицы ориентации, однозначно связанные с погрешностями аналитического построения географического сопровождающего трехгранника α, β, γ [1,10] (погрешности решения БИИМ задачи ориентации объекта);

- погрешности Δb_{1x}^{ort} , Δb_{1z}^{ort} определения ориентации антенной базы \vec{b}_1 , расположенной вдоль продольной оси объекта, относительно связанных с объектом осей;

- неоднозначности вторых разностей фазовых измерений $(\lambda_{i+1}\eta_{i+1} - \lambda_i\eta_i)/|\vec{b}_1|$, где λ_i – длина волны излучаемого НС сигнала, η_i – целое число длин волн на частоте несущих колебаний, определяющее указанную неоднозначность;

- шумы измерений.

В предположении малости начальных погрешностей БИИМ по навигационным параметрам и параметрам ориентации объекта (по курсу – в пределах $\pm 10^\circ$, что соответствует точности магнитных датчиков, по углам качки – в пределах $\pm 3^\circ$) допустима линеаризация измерений (2.2.10). При этом вклад погрешностей БИИМ в погрешности измерений (2.2.10), как правило, при длине базы не более 1 м не превышает половины длины волны, что соответствует углу π фазы колебаний излучаемого НС сигнала.

Предварительная обработка разностных измерений (2.2.10) заключается в следующем. Так как априори известно, что полезная информация (погрешности БИИМ по параметрам ориентации) вместе с шумами составляет менее одной длины волны излучаемого НС сигнала на частоте несущей (около 0.19-0.24м) в

значениях приведённого измерения $Z_{i,i+1}^{b1} \cdot |\bar{b}_1|$, то исключая целое число $(\eta_{i+1} - \eta_i)$ из значения $Z_{i,i+1}^{b1} \cdot |\bar{b}_1|/\lambda_{i+1}$ и оставляя его дробную часть $\tilde{Z}_{i,i+1}^{b1} \cdot |\bar{b}_1|/\lambda_{i+1}$, тем самым исключается из восстановленных измерений $\tilde{Z}_{i,i+1}^{b1}$ неоднозначность фазовых измерений до уровня одной длины волны [1]. При этом необходимо учитывать также и дополнительную неоднозначность вида $\delta\lambda_{i+1} \cdot \eta_i / |\bar{b}_1|$, где $\delta\lambda_{i+1} = \lambda_{i+1} - \lambda_i$ – различие в длинах волн излучаемых сигналов НС ГЛОНАСС. Остаточная неоднозначность фазовых измерений в пределах одной длины волны как случайная величина включается в число оцениваемых параметров.

Измерения $\tilde{Z}_{i,i+1}^{b1}$ вместе с разностными измерениями (2.2.1), (2.2.2), (2.2.4) по навигационным параметрам поступают для последующей обработки в задачу оценивания с использованием алгоритмов обобщенного фильтра Калмана.

Оценки, выработанные в ФК, поступают в обратную связь для коррекции погрешностей БИИМ в выработке параметров ориентации и навигационных параметров, компенсации погрешностей гироскопов и акселерометров, а также коррекции измерений $\tilde{Z}_{i,i+1}^{b1}$ в части их остаточной неоднозначности $\delta\lambda_{i+1} \cdot \eta_i / |\bar{b}_1|$ и погрешностей ориентации базы \bar{b}_1 относительно связанных с объектом осей.

Номинальные $\bar{b}_{1o_m}^{ort}$ (совпадающие с осями БИИМ) и приборные $\bar{b}_{1o_pr}^{ort}$ (отражающие фактическое положение в осях объекта) значения направляющих косинусов вектора \bar{b}_1 в связанных с объектом осях будут соответственно равны

$$\bar{b}_{1o_m}^{ort} = \begin{bmatrix} b_{1x_m}^{ort} \\ b_{1y_m}^{ort} \\ b_{1z_m}^{ort} \end{bmatrix}, \quad \bar{b}_{1o_pr}^{ort} = \bar{b}_{1o_m}^{ort} + \Delta\bar{b}_{1o}^{ort}, \quad \Delta\bar{b}_{1o}^{ort} = \begin{bmatrix} \Delta b_{1x}^{ort} \\ \Delta b_{1y}^{ort} \\ \Delta b_{1z}^{ort} \end{bmatrix}, \quad (2.2.11)$$

где $\Delta b_{1j}^{ort}, (j = x, y, z)$ – погрешности определения ориентации орта $\bar{b}_{1o_pr}^{ort}$. При этом значения $b_{1x_pr}^{ort}, b_{1z_pr}^{ort}$ могут оцениваться по результатам обработки измерений (2.2.10) при наличии угловых перемещений объекта, а составляющая $b_{1y_pr}^{ort} > 0$ – из условия нормирования орта $\bar{b}_{1o_pr}^{ort}$: $(b_{1x_pr}^{ort})^2 + (b_{1y_pr}^{ort})^2 + (b_{1z_pr}^{ort})^2 = 1$. С целью получения искоемых оценок представим линеаризованные разностные измерения (2.2.10) в виде

$$\begin{aligned} \tilde{Z}_{i,i+1}^{b1} = & \left[\begin{matrix} b_{1N_pr}^{ort}(s_{iE} - s_{(i+1)E}) - b_{1E_pr}^{ort}(s_{iN} - s_{(i+1)N}) \\ b_{1h_pr}^{ort}(s_{iN} - s_{(i+1)N}) - b_{1N_pr}^{ort}(s_{ih} - s_{(i+1)h}) \end{matrix} \right] \alpha + \\ & \left[\begin{matrix} b_{1E_pr}^{ort}(s_{ih} - s_{(i+1)h}) - b_{1h_pr}^{ort}(s_{iE} - s_{(i+1)E}) \\ (s_{ix} - s_{(i+1)x})\Delta b_{1x}^{ort} + (s_{iz} - s_{(i+1)z})\Delta b_{1z}^{ort} \end{matrix} \right] \beta + \\ & + \Delta C f_{(i+1)-i} + v_{zi}, \end{aligned} \quad (2.2.12)$$

где $b_{1E}^{ort}, b_{1N}^{ort}, b_{1h}^{ort}$ – направляющие косинусы вектора-базы \bar{b}_1 в географических осях, т.е. элементы вектора $\begin{bmatrix} b_{1E}^{ort} \\ b_{1N}^{ort} \\ b_{1h}^{ort} \end{bmatrix}^T = C_{o,h_pr} \bar{b}_{1o_pr}^{ort}$;

$s_{ij}, s_{(i+1)j}, (j = E, N, h)$ и $s_{ij}, s_{(i+1)j}, (j = x, y, z)$ – элементы ортов $\bar{s}_{ih_pr}, \bar{s}_{io_pr}$ (направляющие косинусы орта \bar{s}_i НС относительно соответственно географических осей и осей объекта), формируемые согласно соотношениям (2.2.7);

$\Delta Cf_{(i+1)-i}$ – погрешности, обусловленные остаточной неоднозначностью вторых разностей фазовых измерений для пары спутников НС_{i+1} и НС_i;

v_{zi} – шумы измерений, включающие, в основном, измерительные шумы ПА СНС.

2.2.3. Расчётная модель погрешностей

При формировании расчётной модели погрешностей системы «ИСОИ-1» использовались следующие аппроксимации:

- смещения нулей гироскопов $\Delta \bar{\omega}_i$ ($i = xb, yb, zb$) и акселерометров $\Delta \bar{a}_i$ от пуска к пуску и их изменчивость в пуске аппроксимируется (из-за отсутствия достоверных данных об их спектральном составе) соответствующими винеровскими процессами [1,13];
- погрешности $\Delta Cf_{(i+1)-i}$ описываются «скачкообразными» случайными процессами в том смысле, что они считаются постоянными для каждой рабочей пары НС, а при смене рабочей пары (что характеризуется «скачком» в измерениях $\tilde{Z}_{i,i+1}^{b1}$) ковариации ошибок оценок этих параметров приравниваются априорным значениям;
- шумы измерений v_{zi} аппроксимируются дискретными белыми шумами с известными дисперсиями.

Расчётная модель погрешностей ИСОИ имеет вид (2.1.10), при этом вектор состояния x имеет структуру

$$x^T = \begin{bmatrix} \beta & \gamma & \Delta V_E & \Delta V_N & \Delta V_h & \Delta \varphi & \Delta \lambda & \Delta h & \Delta \bar{\omega}_{xb} & \Delta \bar{\omega}_{yb} & \Delta \bar{\omega}_{zb} & \Delta \bar{a}_{xb} & \Delta \bar{a}_{yb} & \Delta \bar{a}_{zb} & \Delta Cf_{(i+1)-i} \end{bmatrix}.$$

Переходная матрица $\Phi_{k+1/k}$ формируется, как указано в п. 2.1.2, при этом последняя строка матрицы динамики F , соответствующая погрешности $\Delta Cf_{(i+1)-i}$, заполняется нулями.

Матрица измерений H_{k+1} формируется в соответствии с уравнениями разностных скоростных и позиционных измерений (2.2.1), (2.2.2), курсового измерения (2.2.5), скоростных измерений с опорой на данные относительного лага (2.2.4), а также фазовых измерений (2.2.12). При этом ненулевые элементы матриц, используемых при последовательной обработке данных лага и фазовых измерений двухантенной системы, имеют следующий вид:

- при обработке данных лага

$$H_{L1,1} = -V_N, H_{L1,4} = 1;$$

$$H_{L2,1} = V_E, H_{L2,5} = 1;$$

- при обработке фазовых измерений

$$H_{s1,1} = b_{1N_pr}^{ort} (s_{iE} - s_{(i+1)E}) - b_{1E_pr}^{ort} (s_{iN} - s_{(i+1)N}),$$

$$H_{s1,2} = b_{1h_pr}^{ort} (s_{iN} - s_{(i+1)N}) - b_{1N_pr}^{ort} (s_{ih} - s_{(i+1)h}),$$

$$H_{s1,3} = b_{JE_pr}^{ort}(s_{ih} - s_{(i+1)h}) - b_{Ih_pr}^{ort}(s_{iE} - s_{(i+1)E}),$$

$$H_{s1,16} = 1.$$

В векторе состояния не учитываются погрешности выставки антенной базы в осях объекта ($\Delta b_{1j}^{ort}, (j = x, y, z)$), поэтому соответствующие элементы матрицы H_s равны нулю.

Для отбраковки недостоверных измерений используется безынерционный алгоритм контроля [2], основанный на анализе соответствия невязок измерений их ковариациям, рассчитываемым в ФК.

Следует заметить, что в интегрированной системе «ИСОН-1» реализован и оригинальный поисковый алгоритм [15,16] по оценке и исключению неоднозначности фазовых измерений из их вторых разностей (2.2.6), также предусмотрена возможность определения значений курса K_{gps} по данным СНС [17]. Значения K_{gps} совместно с информацией от БИИМ обеспечивают возможность формирования разностных курсовых измерений для задачи фильтрации. Данная процедура используется в условиях наблюдения группировки НС (не менее 5). При наличии интенсивных помех, сбоев в ПА СНС и видимости меньшего числа НС в задаче фильтрации формируются и обрабатываются измерения (2.2.10), (2.2.12).

2.3. Совместная обработка с использованием ФК данных БИИМ, лага и магнитометров при решении задачи ориентации

В автономном режиме работы ИСОН, когда отсутствуют данные ПА СНС, с использованием расчётной модели погрешностей ИСОН вида (2.2.13) в ФК обрабатываются следующие разностные измерения:

- скоростные измерения вида (2.2.4) с опорой на данные V_L относительного лага

$$z_{V_E^L} = V_{E_pr} - V_L \sin K \cong \Delta V_E - V_N \alpha + v_{V_E},$$

$$z_{V_N^L} = V_{N_pr} - V_L \cos K \cong \Delta V_N + V_E \alpha + v_{V_N},$$

где v_{V_i} ($i = E, N$) – погрешности измерений, включающие морские течения, неизмеряемую поперечную составляющую вектора линейной скорости судна и инструментальные погрешности лага;

- дополнительное курсовое измерение вида (2.2.5) (оно используется в качестве резервного) с привлечением информации от блока магнитометров:

$$z_{MK} = K - K_{mk} \cong \alpha - \Delta \bar{K}_{mk} + \delta K_{mk},$$

где K_{mk} – значение курса магнитного, вычисляемое по данным блока магнитометров; $\Delta \bar{K}_{mk}$, δK_{mk} – систематическая и флюктуационная погрешности вычисления K_{mk} [10].

2.3.1 Алгоритм выработки курса магнитного

В алгоритме выработки магнитного курса используются данные от трёх-осевого блока магнитометров, записанные в осях объекта и пересчитанные по

значениям углов качки (от БИИМ) в оси географической системы координат $E_k N_k H_k$.

Входная информация алгоритма включает в себя:

$F_{i(i=x_o, y_o, z_o)}$ – измеренные магнитометрами значения проекций вектора напряженности магнитного поля Земли на оси объекта;

ψ, θ – значения углов качки, рассчитанные в БИИМ;

H_e, H_n, H_h – известные (по данным о текущих координатах местоположения объекта и цифровой карты параметров вектора напряжённости магнитного поля Земли) для данного местоположения значения проекций вектора напряженности магнитного поля Земли в географических осях [10].

Алгоритм выработки K_{mk} можно представить следующим образом:

- формирование матрицы ориентации связанных с объектом осей x_o, y_o, z_o относительно географической системы координат $E_k N_k H_k$, связанной с курсом объекта:

$$C_{o, h_k} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ \sin\psi \sin\theta & \cos\psi & -\sin\psi \cos\theta \\ -\cos\psi \sin\theta & \sin\psi & \cos\psi \cos\theta \end{bmatrix}; \quad (2.3.1)$$

- преобразование сигналов магнитометров на оси географической системы координат $E_k N_k H_k$

$$\begin{bmatrix} F_{E_k} \\ F_{N_k} \\ F_{H_k} \end{bmatrix} = C_{o, h_k} \begin{bmatrix} F_{x_o} \\ F_{y_o} \\ F_{z_o} \end{bmatrix}; \quad (2.3.2)$$

- вычисление текущих значений курса

$$K_{mk} = \arctg\left(\frac{-F_{E_k}}{F_{N_k}}\right), \quad (2.3.3)$$

значение K_{mk} приводится к круговому диапазону $0-360^\circ$ при этом если $K_{mk} < 0$, тогда $K_{mk} = K_{mk} + 2\pi$

2.3.2 Калибровка блока магнитометров

При использовании в составе ИСОН блока магнитометров необходимо решение задачи их предварительной калибровки в условиях стенда с целью оценки смещений нулей. Для этого могут быть сформированы следующие измерения:

$$\begin{aligned} \vec{z}_F(k+1) &= C_{o, h_k - pr} \vec{F}_{o - pr}(k+1) - C_{h, h_k - pr} \vec{H}_{h - et}(k+1), \\ \vec{z}_K(k+1) &= K_{mk}(k+1) - K_{et}(k+1), \end{aligned} \quad (2.3.4)$$

где

\vec{F}_{o_pr} – текущие приборные значения магнитометров, установленных в осях $x_b y_b z_b$ ИБ ИИМ, приведенные к осям объекта $x_o y_o z_o$: $\vec{F}_{o_pr} = C_{b,o} \vec{F}_{b_pr}$, здесь $C_{b,o}$ – матрица привязки измерительных осей ИБ ИИМ к осям объекта;

$C_{o,h_k}(\psi, \theta)$ - матрица ориентации согласно (2.3.1);

$$C_{h,h_k}(K_{mk}) = \begin{bmatrix} \cos K_{mk} & -\sin K_{mk} & 0 \\ \sin K_{mk} & \cos K_{mk} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \text{матрица перехода от осей географического}$$

трехгранника ENH к географической системе координат $E_k N_k H_k$, связанной с курсом основания ИИМ;

$\vec{H}_{h_et} = [H_e, H_n, H_h]^T$ – значения составляющих вектора напряженности магнитного поля Земли в условиях стенда в осях географического трехгранника ENH , вычисляемые по данным карты (T_m – модуль вектора, d – склонение, θ_m – наклонение):

$$H_e = T_m \cos \theta_m \sin d, H_n = T_m \cos \theta_m \cos d, H_h = -T_m \cos \theta_m \sin \theta_m; \quad (2.3.5)$$

K_{et} – эталонное значение курса основания ИИМ, определенное высокоточными средствами.

Линеаризованные измерения (2.3.4) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} z_1 &= c_{11} \Delta F_x + c_{12} \Delta F_y + c_{13} \Delta F_z - \cos K \cdot A_E + \sin K \cdot A_N + (H_e \sin K + H_n \cos K) \Delta \bar{K}_{mk} + v_1, \\ z_2 &= c_{21} \Delta F_x + c_{22} \Delta F_y + c_{23} \Delta F_z - \sin K \cdot A_E - \cos K \cdot A_N + (-H_e \cos K + H_n \sin K) \Delta \bar{K}_{mk} + v_2, \\ z_3 &= c_{31} \Delta F_x + c_{32} \Delta F_y + c_{33} \Delta F_z - A_H + v_3, \\ z_4 &= \Delta \bar{K}_{mk} + v_4, \end{aligned} \quad (2.3.6)$$

где $\Delta F_i (i = x_o, y_o, z_o)$ – смещения нулей магнитометров;

$A_j (j = E, N, H)$ – погрешности априорной информации о составляющих вектора напряженности магнитного поля Земли в осях географического трехгранника ENH с учетом аномалий магнитного поля стенда;

$v_{(1...4)}$ - шумы измерений, обусловленные, в основном, флюктуационными составляющими погрешностей магнитометров.

Для обработки измерений (2.3.4) используется алгоритм фильтра Калмана. При этом смещения нулей $\Delta F_i (i = x_o, y_o, z_o)$ магнитометров, аномалии $\vec{A}_h = [A_E, A_N, A_H]^T$ магнитного поля стенда и систематическая $\Delta \bar{K}_{mk}$ погрешность вычисления курса магнитного аппроксимируются соответствующими винеровскими процессами [10, 13], а шумы измерений v_k - дискретными белыми шумами с известными дисперсиями. В этом случае вектор состояния расчетной модели погрешностей (2.1.10) представляется как $x^T = [A_E \quad A_N \quad A_H \quad \Delta F_x \quad \Delta F_y \quad \Delta F_z \quad \Delta \bar{K}_{mk}]$, а матрица динамики $F_{(7 \times 7)}$ - нулевая матрица.

Матрица измерений H_{k+1} размерности 4×7 формируется в соответствии с уравнениями (3.3.6).

Оценки $\Delta \hat{F}_i, (i = x_o, y_o, z_o)$ погрешностей магнитометров, вычисленные на выходе ФК, используются в дальнейшем для коррекции выходных данных магнитометров при вычислении курса магнитного.

3. ОПИСАНИЕ ИСОН, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТАХ

3.1. Экспериментальный образец ИСОН с высоким уровнем интеграции для высокоманевренных объектов

3.1.1. Назначение, состав, основные технические характеристики

Российскими предприятиями ЦНИИ «Электроприбор» и ОАО «РИРВ» с 2006 г. совместно проводился цикл работ по разработке и экспериментальным исследованиям ИСОН, построенной по сильносвязанной схеме и предназначенной для широкого применения на наземном транспорте, морских судах, малых самолетах и вертолетах, беспилотных летательных аппаратах и т.п. При этом особое внимание уделялось проблемам повышения помехоустойчивости интегрированной системы (путем сужения полосы пропускания следящих систем измерения радионавигационных параметров) и повышения точности в решении задачи ориентации объекта (за счет использования вторых разностей фазовых измерений на разнесенные антенны).

В состав экспериментального образца (ЭО) ИСОН входят бескарданный инерциальный измерительный модуль (ИИМ), построенный на микромеханических датчиках (ММД) разработки ЦНИИ «Электроприбор», и приёмная аппаратура спутниковых навигационных систем (ПА СНС) разработки ОАО «РИРВ». Для формирования вторых разностей фазовых измерений ПА СНС содержит две пространственно разнесенные антенны и два подключенных к ним идентичных модуля приёмовычислительных (МПВ1 и МПВ2).

Спецвычислители ИИМ (на базе TMS320F2812) и МПВ1 (на базе TMS320VC5416ZGU) связаны синхронным последовательным интерфейсом (SPI).

Алгоритмы реального времени, реализованные в вычислителе ИИМ, позволяют решать задачи ориентации и навигации с частотой $1/dT = 100$ Гц при поступлении данных от ПА СНС с частотой 1 Гц.

Алгоритмы реального времени, реализованные в вычислителях МПВ1 и МПВ2, позволяют решать задачу определения координат, скорости и времени (КСВ - решение) по сигналам СНС с частотой до 5 Гц и формировать при этом «сырые данные» СНС (псевдодальности и скорости изменения псевдодальностей) с частотой до 10 Гц. МПВ формируют также импульсный периодический сигнал «1 Гц», привязанный к шкале времени СНС. Сигнал «1 Гц» из МПВ1 подается в ИИМ для обеспечения синхронизации информационных потоков.

Для интеграции данных ИИМ и ПА СНС в вычислителе ИИМ реализован алгоритм обобщенного фильтра Калмана, обеспечивающий оценку погрешностей ИИМ для их коррекции в обратной связи. При этом в реальном времени реализован алгоритм совместной обработки данных ИИМ и ПА СНС по составляющим вектора линейной скорости и координатам места, а в камеральном режиме – по первичным навигационным параметрам (дальностям и радиальным скоростям).

Для поддержки работы МПВ1 в реальном времени в него от ИИМ в темпе 100 Гц передаются данные о составляющих вектора линейной скорости и координатах местоположения объекта. Эти данные в вычислителе МПВ1 пересчитываются в радиальные скорости (см. п.2) для всех НС СНС, которые используются как целеуказания в следящих измерителях радионавигационных параметров, что позволяет сузить их полосы и повысить помехозащищенность ПА СНС, а также в алгоритме поиска сигналов НС, что позволяет сократить время восстановления сопровождения сигналов НС после их кратковременного пропадания, вызванного затенением или действием помех.

При выполнении цикла работ по созданию ИСОН были проведены испытания ЭО ИСОН на неподвижном основании и на автомобиле. Испытания на автомобиле проводились в разных условиях: при хорошей наблюдаемости НС СНС, в условиях затенения части рабочего созвездия НС и при действии помех (излучение передатчиков телевизионного центра), в условиях циклического действия перегрузок (движение по окружности и по «восьмерке» минимального радиуса с максимально возможной в условиях эксперимента скоростью).

3.1.2. Описание ЭО ИСОН

ИИМ на микромеханических датчиках

Бескарданный ИИМ интегрированной системы состоит из корпуса, платы чувствительных элементов (ЧЭ), на которой размещены гироскопы и акселерометры с обеспечивающей электроникой, и платы НС, содержащей контроллер на базе сигнального процессора TMS320F2812 (рис. 3.1.1, 3.1.2), осуществляющий обработку навигационной информации.

Входящие в ИИМ ЧЭ имеют уровень собственных шумов $0,07^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$ по угловым скоростям и $0,0002 \text{ м}/\text{с}^2/\sqrt{\text{Гц}}$ по линейным ускорениям. Зависимости дрейфов ЧЭ от температуры при использовании алгоритмической компенсации были доведены до $0,01^\circ/\text{с}/^\circ\text{C}$ и $0,0003 \text{ м}/\text{с}^2/^\circ\text{C}$ соответственно (здесь нужно отметить, что в приборе температура при проведении испытаний колебалась в пределах $\pm 3^\circ\text{C}$). Была также проведена ортогонализация осей чувствительности ЧЭ с точностью до $3'$ и введена компенсация влияния линейных ускорений на выходные сигналы гироскопов.

Приёмная аппаратура СНС

В состав АП СНС входят два модуля 2К-363-62 и два антенных устройства (рис.3.1.3-3.1.5), представляющих собой малогабаритную активную микрополосковую антенну диапазона L1 ($\varnothing 73 \times 21 \text{ мм}$; 300 г).

Малогабаритный навигационный модуль ($80 \times 55 \times 12,5 \text{ мм}$; 75 г), содержащий 36 приемоизмерительных каналов (ПИК), обеспечивает обработку сигналов стандартной точности СНС ГЛОНАСС и GPS в диапазонах L1 и L2, а также прием сигналов широкозонных дифференциальных подсистем типа SBAS и обработку поступающих извне дифференциальных данных (поправок) стандарта RTCM. МПВ выдает навигационные параметры (координаты, составляющие вектора линейной скорости и время) с частотой 1, 2, 5 Гц и радио-

навигационные параметры (псевдодальности, приращения псевдодальностей и фазовые отсчеты псевдодальности) с частотой 1, 2, 5, 10 Гц. При этом обеспечиваются среднеквадратические значения погрешностей по координатам – 1,4 м в плане; 1,5 м по высоте; по скорости – 0,015 м/с в плане; 0,015 м/с по высоте; по времени – 20 нс на стоянке, 50 нс в движении.

а)

б)

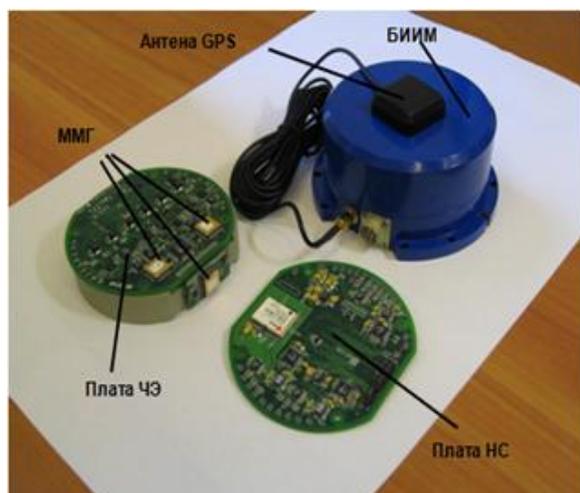


Рис. 3.1.1. Бескарданный ИИМ (ф. «Электроприбор») с ИБ на ММД (ф. Analog Devices)

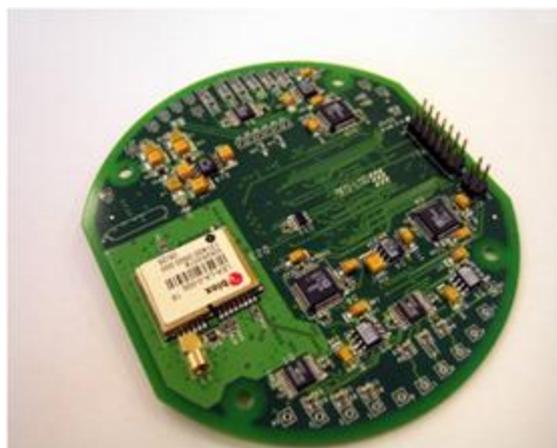


Рис.3.1.2. – Плата НС-(плата электроники)

МПВ 2К-363-62 имеет две опции исполнения: работающую от внутреннего и от внешнего опорного генератора. МПВ1, интегрируемый с БИИМ, использует в качестве опорного сигнал внешнего термостатированного генератора типа ГК-62ТС; МПВ2, работающий автономно, использует в качестве опорного сигнал внутреннего термокомпенсированного генератора типа ТХО225 RAKON.

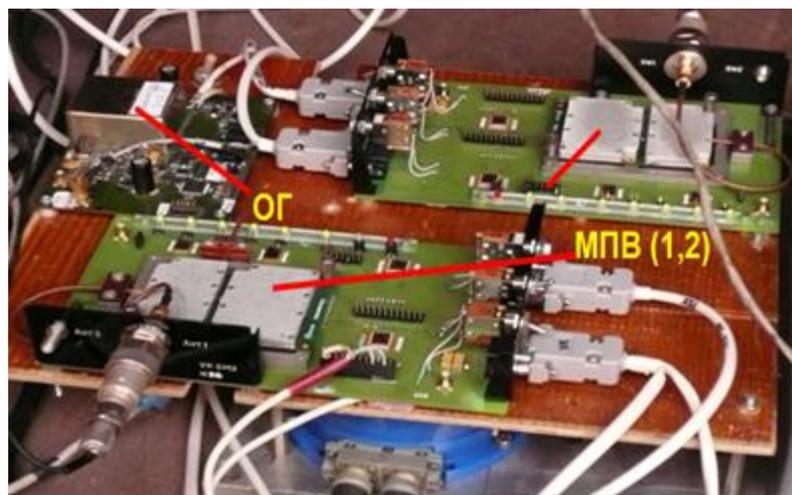


Рис. 3.1.3. Внешний вид модулей приемовычислительных ПА СНС



Рис. 3.1.4 Внешний вид модулей приемовычислительных ПА СНС в системе



Рис. 3.1.5 Антенные устройства, установленные на крыше автомобиля

Программное обеспечение

Описание программного обеспечения ЭО ИСОН, построенной по сильно-связанной схеме в части решения задачи навигации, для камеральной обработки данных в пакете MATLAB(Simulink) приведено в приложении П2. Оно включает следующие программы:

- *loader_Prsm_raw27idl_EmMMG_4m.m*;
- *SS_IS25re_MMGdat_6NS_131_27idl_avt_prN1.m*,
- *SS_IS25Are_VGMG_6NS_131K_avt_prN1.mdl*,
описание которых см. в приложении П1.

3.2. СНС-компас «ИСОН-1»

3.2.1. Описание конструкции

СНС-компас «ИСОН-1» представляет собой интегрированную систему ориентации и навигации с автономным режимом работы. Экспериментальный образец (ЭО) системы состоит из:

- центрального прибора (рис. 3.2.1а, 3.2.2), содержащего:
 - микромеханический инерциальный измерительный модуль ADIS16405, который включает три гироскопа, три акселерометра и три магнитометра;
 - ВОГ ВГ035ПДШ ф. «Физоптика» с вертикальной осью чувствительности;
 - двух приёмных модулей СНС 1К-161-42 ОАО «РИРВ»;
 - приёмника корректирующей информации (ПКИ) от наземных станций;
 - вычислителя на базе микроконтроллера TMS320F28335, обеспечивающего предварительную обработку фазовых измерений ПА СНС и выработку СНС-курса (МК-СОИ),
 - навигационного вычислителя на базе микроконтроллера TMS320F28335 (МК-ОП);
- антенного устройства ПА СНС (рис. 3.2.1б), содержащего два приемных антенных модуля, разнесенных на базе 1.5 м;
- мобильного управляющего компьютера, выполняющего функции прибора управления и индикации.

Система «ИСОН-1» имеет также возможность приема данных от судового лага для обеспечения автономного режима работы.

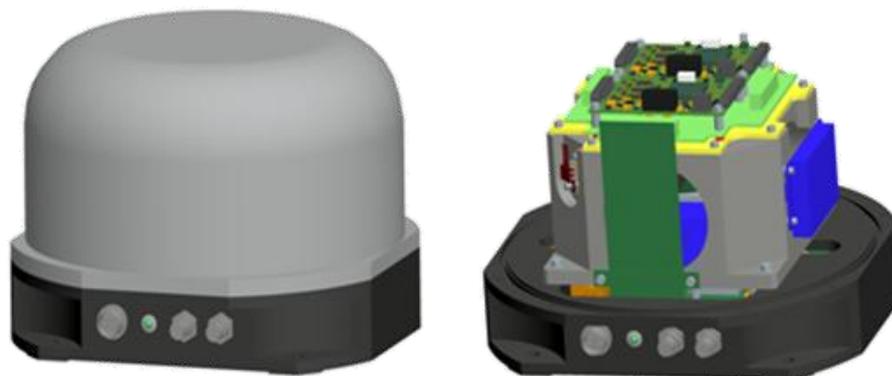


Рис. 3.2.1а. Внешний вид центрального прибора системы «ИСОН-1»

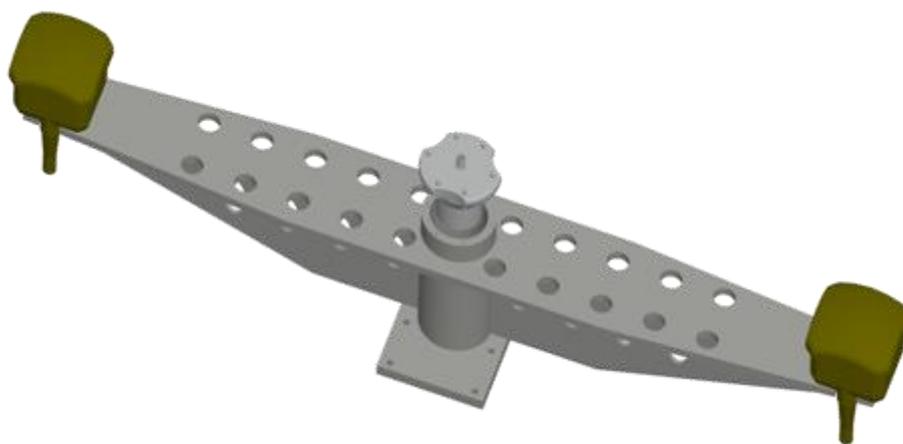


Рис. 3.2.1б. Внешний вид антенного устройства ПА СНС системы «ИСОН-1»

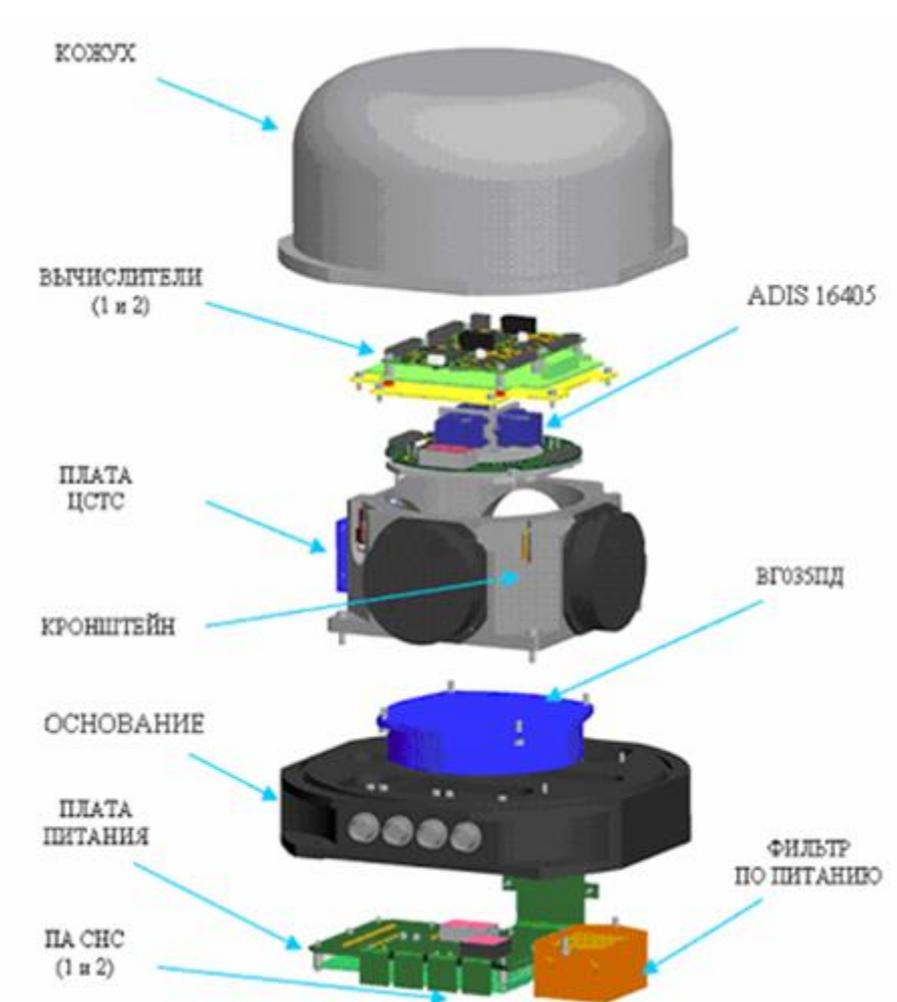


Рис. 3.2.2. Сборка центрального прибора системы «ИСОН-1»

Массогабаритные характеристики центрального прибора: $\varnothing 250 \times 173$ мм, ориентировочный вес – 10 кг. Энергопотребление от 15 до 65 Вт (в зависимости от температуры окружающей среды) от источника постоянного тока 27 ± 5 В.

Кожух центрального прибора является тепловым, электрическим и магнитным экраном.

Включение в состав центрального прибора системы «ИСОН-1» двух вычислителей обусловлено сложностью и объемом задач, решаемых в изделии. При такой схеме построения один из вычислителей предназначен для решения задач выработки параметров ориентации и навигационных параметров движения судна. Указанные параметры являются выходными для «ИСОН-1» и передаются как потребителю по соответствующему интерфейсу, так и в мобильный компьютер. Второй вычислитель предназначен исключительно для обработки фазовых измерений от двух приемников СНС. Выходные параметры этого вычислителя напрямую передаются в первый вычислитель для последующей обработки.

Включение в состав «ИСОН-1» цифровой системы термостабилизации (ЦСТС), содержащей плату ЦСТС (рис. 3.2.2), термодатчик и нагреватели, вызвано необходимостью снижения влияния температуры на инструментальные погрешности инерциальных ЧЭ БИИМ при достаточно широком температурном диапазоне, в котором предполагается эксплуатация системы.

Для точной установки на объекте корпус центрального прибора имеет точную посадочную поверхность и отверстия под штифты для ориентации относительно строительных осей объекта.

Два антенных модуля закреплены на жестком кронштейне (рис. 3.2.1б), который должен крепиться на горизонтальную поверхность площадью ~200x200 мм.

ЭО системы «ИСОН-1» обслуживается одним оператором с помощью мобильного управляющего компьютера (УК) на базе стандартного ноутбука. Для управляющего компьютера было создано специальное ПО, работающее под управлением стандартной операционной системы и обеспечивающее:

- настройку всех модулей, входящих в центральный прибор системы,
- наблюдение за работой системы в реальном времени,
- сбор всей измеряемой и транслируемой через центральный прибор информации для последующей камеральной обработки.

3.2.2. Особенности программного обеспечения

Программное обеспечение (ПО) системы «ИСОН-1» предназначено для:

- сбора первичной информации с инерциального модуля, приемников СНС и внешнего измерителя – лага;
- выработки полного набора параметров ориентации и навигации объекта;
- обеспечения отображения и регистрации исходной и выходной информации на мобильном управляющем компьютере.

Аппаратно ПО размещается на трёх платформах: двух микроконтроллерах собственной разработки МК-ОП и МК-СОИ и в мобильном управляющем компьютере.

Функционально все ПО разделяется на три модуля:

- ПО ИСОН размещается в микроконтроллере МК-ОП;
- ПО СНС, предназначенное для формирования вторых разностей фазовых измерений и выработки курса по фазовым измерениям двух приемников СНС, размещается в микроконтроллере МК-СОИ;

- ПО УК, разработанное в среде Windows XP и предназначенное для отображения информации, регистрации данных и управления режимами работы микроконтроллеров и приемников СНС, размещается в переносном персональном УК.

Структурно ПО СНС и ПО ИСОН состоят из аппаратного ПО (АПО), обеспечивающего взаимодействие ПО с аппаратной частью МК (АЦП, внутренними и внешними интерфейсами) и функционального ПО (ФПО), обеспечивающего реализацию заданных алгоритмов обработки входных сигналов и подготовку массивов для выдачи потребителю или на регистрацию.

Аппаратное программное обеспечение (АПО) микроконтроллеров состоит из двух частей:

- резидентная часть ПО (загружается в контроллер через внутренний интерфейс и должна обеспечивать возможность загрузки основного ПО и файла параметров через штатный выходной интерфейс с гальванической развязкой);

- ПО, обслуживающее внешние и внутренние интерфейсы и АЦП в процессе работы основной программы.

В резидентном ПО предусмотрено два варианта загрузки программ через штатный порт: в первые 30÷60 секунд после подачи питания и после выхода из основной программы по получении команды по рабочему порту. По окончании установленной начальной задержки или после подачи другой команды по загрузочному порту должно запускаться штатное ПО.

Порт МК, обеспечивающий возможность передачи данных одновременно по RS232 и RS485, позволяет также осуществлять управление основным ПО с помощью команд, подаваемых в МК по одному из них (RS232 или RS485).

Временная диаграмма работы ПО

Синхронизированный опрос всех инерциальных модулей осуществляется на частоте 1200 Гц, задаваемой цифровым ДУС ВГ035.

Решение задачи ориентации и навигационной задачи осуществляется на частоте 100 Гц. Задача фильтрации решается на частоте 1÷5 Гц. При этом встроенный генератор (или делители) синхронизируются по фронту импульса PPS1, поступающего на частоте 1 Гц из приемника СНС.

Импульс PPS1 поступает из основного приемника СНС непосредственно на МК, в котором размещено ПО ИСОН.

Для обеспечения возможности контроля работы изделия при испытаниях на прецизионных стендах ПО ИСОН должно вырабатывать аппаратный импульс SINHR на частоте ~100 Гц, совпадающий с каждым моментом запуска опроса датчиков. А точнее, с моментом запуска 1200 Гц отсчета, следующего за окончанием формирования приращений интегралов сигналов инерциальных датчиков для задач ориентации и навигации. На этот же момент должен формироваться пакет входных 100 Гц данных по исходным сигналам всех инерциальных датчиков и их интегралам, а также пакет выходных данных ИСОН.

Импульс SINHR вырабатывается только в том МК, в котором размещено ПО ИСОН.

Выходные данные дополнительного приёмника СНС содержат только два предложения ID151 (74 байта) и ID148 (от 0 до 866 байт). Они поступают в МК-СОИ (ПО СНС) и без расшифровки транслируются в МК-ОП (ПО ИСОН) по CAN-интерфейсу.

Выходные данные основного приемника СНС кроме предложений ID151 и ID148 содержат еще несколько предложений общим объемом до 2000 байт. Они поступают в МК-СОИ (ПО СНС), где и расшифровываются.

Данные СНС, необходимые для работы ПО ИСОН (курс, первые/вторые разности фаз, координаты, скорости и их дисперсии, признаки достоверности, и т.д.), формируются в ПО СНС в виде трёх посылок, передаваемых на частоте работы ПА СНС(1÷5 Гц).

Все паспортизованные данные ЧЭ и выходные данные ПО ИСОН формируются на частоте 100 Гц и выдаются по интерфейсу RS232/RS485.

Часть данных, необходимых для поддержки ПО СНС, а также для отображения и регистрации информации в УК, передается в ПО СНС по CAN-интерфейсу также на частоте 100 Гц.

Данные от судового лага по RS422 на частоте 1÷15 Гц поступают в задачу фильтрации ПО ИСОН.

Все данные обоих приёмников СНС, ПКИ и ПО ИСОН, необходимые для индикации и регистрации в УК, выводятся из центрального прибора через порт RS232/RS485 на частоте 10÷20 Гц в фоновом режиме по мере готовности данных в ПО СНС.

Интервал решения задачи фильтрации выбирается таким образом, чтобы все её алгоритмы (включая и обработку фазовых измерений) успевали выполняться примерно за половину этого интервала. Инициатором запуска задачи фильтрации является сигнал о моменте окончания формирования выходных данных (курса, первых или вторых разностей, навигационного решения) в ПО СНС.

В связи с тем, что ПА СНС размещена внутри изделия, и, следовательно, импульс PPS1 поступает всегда, временная шкала в контроллерах синхронизируется по генератору приёмника независимо от наличия или отсутствия приёма от спутников (информация об отсутствии достоверных данных формируется в ПО СНС). Поэтому режим работы без PPS1 нужен только для отладки ПО ИСОН в автономном режиме (без связи с ПО СНС). При этом если отладка проводится с помощью имитатора, то имитатор должен формировать и сигнал PPS1 (например, по каналу DTR интерфейса RS232).

3.3. СНС-компас «ИСОН-2»

СНС-компас ИСОН-2 (рис. 3.3.1) является высокоточной и надежной системой, вырабатывающей данные о курсе, углах и угловых скоростях качки и рыскания, линейной скорости и координатах местоположения судна. Система «ИСОН-2» включает ПА СНС DGPS с четырьмя разнесенными антеннами, обеспечивающую дифференциальный режим работы и фазовые интерферометрические измерения, а также бескарданный инерциальный измерительный блок (ИБ) на дешевых малогабаритных кварцевых гироскопах вибрационного

типа. ИБ включает три гироскопа, три линейных акселерометра, три феррозонда и обеспечивающую электронику.

На рис. 3.3.1 обозначены:

ИБ на ММД и МД – измерительный блок на микромеханических датчиках и магнитометрах, входящий в состав ИИМ;

K – курс;

K_{mk} – курс магнитный;

ψ, θ – углы качки;

∇h – вертикальные перемещения судна;

$\Delta\hat{K}, \Delta\hat{\psi}, \Delta\hat{\theta}$ - оценки погрешностей по курсу и углам качки;

коррекция от DGPS – приём поправок в дифференциальном режиме ПА СНС.

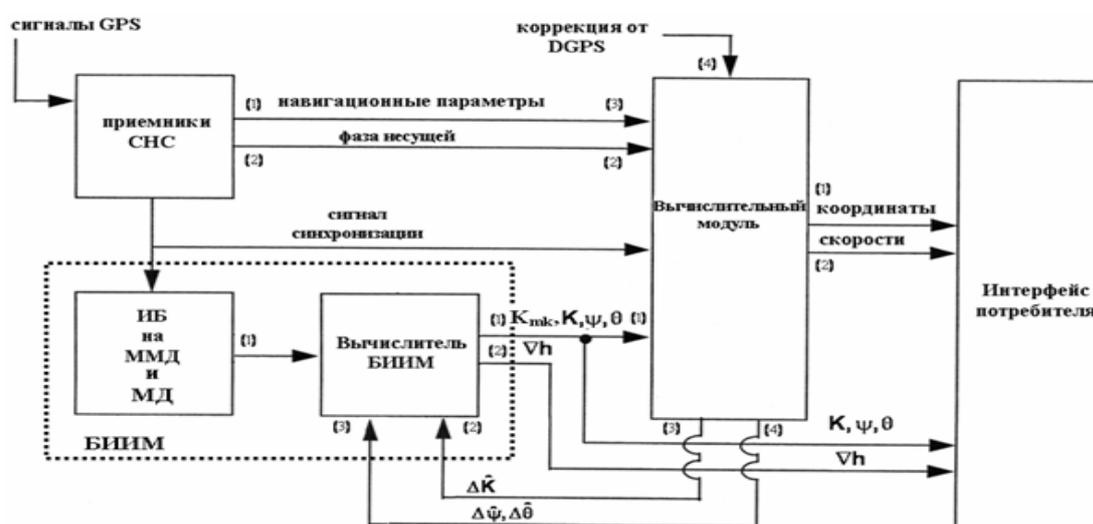


Рис.3.3.1 Блок-схема ИСОН-2

ИБ ИСОН-2 имеет следующие точностные и технические характеристики.

Диапазон измерений:

- по углу неограничен;
 - по угловой скорости 150°/с;
 - по линейному ускорению 30 м/с²;
- Частота измерений 200 Гц;

Погрешности:

- по угловой скорости в диапазоне частот качки и рыскания (5·10⁻³...5·10⁻²)°/с;
 - по линейному ускорению 2% от измеряемой величины;
- Среднее время наработки на отказ 50000 ч;
- Массогабаритные характеристики (инерциального модуля):
- размеры Ø105 × 204 мм;
 - масса 2,5 кг.

Точностные и технические характеристики системы ИСОН-2:

Погрешности выработки:

- курса и углов качки 0,05° (1σ)
- координат местоположения 3...5 м (2σ) (PDOP < 2,5)
- приращений плановых координат < 0,05 м (1σ)
- линейной скорости 0,03 м/с (1σ) (PDOP < 2,5)

Внешний интерфейс

- вывод данных 4 линии RS232/RS422
- скорость передачи 38,4 кБод
- интервал уточнения данных 0,01 с, 0,02 с, 0,03с
- форматы вывода сообщения Seatex Binary, Simrad, EM1000, NMEA 0183

- ввод данных 2 линии RS232/RS422
- DGPS коррекция RTCM-104 Версия 2.0
- Гирокомпас NMEA 0183, Robertson

Электропитание

- напряжение 24 В постоянный ток +25%
- потребляемая мощность 75 Вт

Массогабаритные характеристики

- процессорный блок 522 × 132 мм, масса 15 кг
- антенный блок 2700 × 1200 × 100 мм

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

4.1. Лабораторная работа № 1. «Исследование алгоритмов работы и анализ точности экспериментального образца ИСОН с БИИМ на ММД, построенной по сильносвязанной схеме в части решения задачи навигации»

Цель работы: изучение ИСОН, построенной по сильносвязанной схеме в части решения задачи навигации, в том числе её структуры и режимов работы, дискретных алгоритмов интеграции данных БИИМ на ДУС. Изучение особенностей функционирования сильносвязанной ИСОН в условиях наблюдения множества НС и ограниченного числа НС. Изучение особенностей имитационной модели сильносвязанной системы на ДУС.

4.1.1. Описание лабораторной установки, массивов исходных данных и программ для их чтения и обработки

Лабораторная работа основана на обработке данных, собранных в ходе объектовых (автомобильных) испытаний ЭО ИСОН, который состоит из бескарданного ИИМ с ИБ на ММД (ЦНИИ "Электроприбор"), двух спутниковых приёмников 2К-363-62 (ф. РИРВ) с двумя антенными устройствами, блоков питания. В качестве источников эталонных данных использовались ИИМ на ВОГ IMU-120 ф. IXblue (Франция) класса точности $0.01^\circ/\text{ч}$ – в качестве эталонного измерителя по курсу и углам качки, ПА СНС ф. Javad, обеспечивающая точность регистрации траектории движения в дифференциальном кодовом режиме около 1 м. Регистрация результатов испытаний проводилась с помощью персонального компьютера (ПК). Описание ЭО ИСОН приведено в разделе 3.1.2.

Массивы данных объектовых (автомобильных) испытаний ЭО ИСОН для камеральной обработки в пакете MATLAB(Simulink) включают:

- данные гироскопов и акселерометров ИБ БИИМ на частоте 100 Гц (массив AGm) с учётом реальной задержки относительно импульса PPS1;
- значения первичных навигационных параметров (псевдодальности и радиальные скорости для каждого НС) от приёмников СНС на частоте 10 Гц, привязанные к импульсу PPS1 (массив s4);
- данные для эталонирования: значения координат, скорости и времени (КСВ-решение) по сигналам СНС с частотой 1 Гц от спутникового приемника Ashtech G12, привязанные к импульсу PPS1 (массив s0); значения путевого угла по данным спутникового приемника (массив s2).

Испытания на автомобиле проводились в разных условиях: при хорошей наблюдаемости НС СНС, в условиях затенения части рабочего созвездия НС и при действии помех (излучение передатчиков телевизионного центра), в условиях циклического действия перегрузок (движение по окружности и по «восьмерке» минимального радиуса с максимально возможной в условиях эксперимента скоростью).

Используемое программное обеспечение (модель ISON_real_dRoRo_P1):

- loader_Prsm_raw27id1_EmMMG_4m.m;
- SS_IS25re_MMGdat_6NS_131_27id1_avt_prN1.m,
- SS_IS25Are_VGMG_6NS_131K_avt_prN1.mdl,

описание которого приведено в приложении П1.

4.1.2. Порядок выполнения лабораторной работы

Действия оператора:

1. Запустить программу MATLAB (версия не ниже 7.3) (ярлык программы  находится на «Панели задач»), в окне «Current Directory» указать путь к рабочей папке C:\LAB_ISON_silnos\lab_1\ ISON_real_dRoRo_P1.

2. Открыть файл loader_Prsm_raw27id1_EmMMG_4m.m (для этого нажать ) и загрузить его данные в рабочую область Workspace MATLAB, нажав кнопки Debug→Run.

После нажатия на кнопку Run данные будут загружены в рабочую область, а на экран будут выведены пять рисунков (*Figure1, ..., 5*), дающих представление об условиях проведения эксперимента.

На рисунке 1 (Figure 1) отображаются:

- график траектории движения автомобиля (слева вверху) в географических осях, приведённых в [м];

- графики широты места φ (справа вверху), [м], изменения северной составляющей скорости движения VN (слева внизу), [м/с], изменения высоты места H (справа внизу), [м], поступающих в реальном времени от второго приёмника 2К-363-62 (синий график), поступающих в реальном времени от первого приёмника 2К-363-62 на частоте 1 Гц (зелёный график), полученных при пост-обработке данных первого приёмника 2К-363-62 на частоте 10 Гц (красный график); на указанных графиках по оси абсцисс отложено время t , [с].

На рисунке 2 (Figure 2) отображаются:

- место расположения автомобиля (обозначено маркером “звездочка”) в декартовой системы в осях гринвичской системы координат;

- траектории движения наблюдаемых HC_i .

Координаты точек на рисунке приведены в [м].

На рисунке 3 (Figure 3) отображаются:

- графики изменения радиальных дальностей до наблюдаемых HC, [м] (с учётом коэффициента $1/10^6$).

На рисунке 4 (Figure 4) отображаются:

- графики изменения радиальных скоростей наблюдаемых HC, [м/с].

На рисунке 5 (Figure 5) отображаются:

- показания триады микромеханических акселерометров (синие графики) и кварцевых компенсационных акселерометров типа АК10/4 (зелёные графики) в осях ИБ (x_b, y_b, z_b) (колонка графиков слева);

- показания триады микромеханических гироскопов (синие графики) и волоконно-оптических гироскопов (зелёные графики) в осях ИБ (x_b, y_b, z_b) (колонка графиков справа).

На графиках по осям абсцисс отложено время t в [с].

3. Открыть файл *SS_IS25re_MMGdat_6NS_131_27idl_avt_prN1.m* и загрузить его данные в рабочую область Workspace MATLAB.

4. После того, как все необходимые переменные загружены в рабочую область, необходимо войти в пакет Simulink, щелкнув в окне MATLAB по иконке  запуска основного окна Simulink. А затем клик по значку  в окне Simulink.

5. Открыть в пакете Simulink файл *SS_IS25Are_VGMG_6NS_131K_avt_prN1.mdl*.

6. Указать в меню настроек Simulation → Simulation Parameters значение параметра Stop Time, равное t_c (с), а также шаг дискретности (dt) и численный алгоритм (Euler) интегрирования. Значения t_c и dt приведены в соответствующих файлах *.m.

7. Произвести настройку модели для реализации автономного режима работы ИСОН. Для этого войти в блок (subsystem) $u(k)_{FK_N}$ и отключить из обработки измерения Z_{NSi} от всех НС и курсовое измерение Z_K , используя ключи (Manual Switch) 1-4,10,11,9. Соответственно обнулить значение матрицы H измерений. Для этого в блоке $u(k)_{FK_N}$ воспользоваться ключом (Manual Switch) 15.

8. Задать в блоках To File записи результатов моделирования (группа 9 блоков имитационной модели, см. Приложение П1, глава 5) соответствующие имена файлов *.mat, например *DV_27idl_avt.mat*.

9. Запустить процесс обработки массива данных, нажав кнопки Simulation→Start (или кнопку  на панели инструментов в окне Simulink-модели *SS_IS25Are_VGMG_6NS_131K_avt_prN1.mdl*).

10. После окончания моделирования построить с использованием программ *plot_DV.m*, *plot_DS.m*, *plot_Or.m* по значениям, записанным в соответствующие файлы *.mat, графики погрешностей системы по навигационным параметрам и параметрам ориентации для автономного режима работы. При существующей конфигурации имитационной модели в качестве погрешности ИСОН по курсу в файле погрешностей ориентации системы фиксируется разница путевого угла ПА СНС и курса ИСОН. Графики необходимо внести в отчёт.

11. Повторить п.п. 1.7-1.10 при работе ИСОН в обсервационном режиме с использованием данных: а) любых 2-х; б) 3-х; в) 4-х НС и 6-ти HC_i . При этом каждый раз в блоке $u(k)_{FK_N}$ формировать соответствующее используемым измерениям значение матрицы H . Для чего необходимо "обнулять" соответствующие строки матрицы наблюдений, поступающей в блок Goto37 (блок From81).

После окончания каждого режима моделирования построить с использованием программ *plot_DV.m*, *plot_DS.m*, *plot_Or.m*, *plot_CDr.m*, *plot_Dn.m*, *plot_k2.m*, *plot_POr.m*, *plot_PCDr.m*, *plot_PDn.m*, *plot_Pk2.m* графики результатов моделирования.

4.1.3. Содержание отчёта

Отчёт о выполненных исследованиях должен включать:

1. Краткое описание структуры и состава ЭО ИСОН, массивов данных испытаний, средств эталонирования.
2. Характеристики модели погрешностей микромеханических гироскопов и акселерометров ИБ БИИМ, а также дрейфа частоты опорного генератора используемого приёмника СНС.
3. Анализ результатов работы ИСОН в автономном режиме и с различным составом группировки НС в обсервационном режиме.
4. Оценку наблюдаемости составляющих моделей погрешностей гироскопов и акселерометров ИБ БИИМ, дрейфа частоты опорного генератора приемника СНС и уровень ошибок их оценок (по анализу работы ковариационного канала ФК).

4.1.4. Контрольные вопросы

1. Перечислите существующие варианты схем совместной обработки данных инерциального модуля и спутниковой аппаратуры?
2. Дайте определения понятий: слабосвязанная, сильносвязанная, тесносвязанная инерциально-спутниковые системы.
3. Перечислите состав параметров (величин) навигационного сообщения ГНСС, используемых для определения расчётных значений радиальных скоростей и дальностей, необходимых для формирования разностных измерений в задаче фильтрации по совместной обработке данных ИИМ и спутниковой аппаратуры.
4. Поясните физический смысл понятий: псевдодальность, псевдоскорость.
5. Что такое дифференциальный режим работы спутниковой навигационной аппаратуры?
6. Какие системы функциональных дополнений ГНСС существуют?
7. Какие системы ГНСС существуют? Кратко охарактеризуйте их.
8. Сколько навигационных спутников необходимо одновременно наблюдать интегрированной системе, построенной по схеме сильносвязанного комплексирования для решения навигационной задачи? Почему?
9. Какова точность определения эфемеридной информации о координатах навигационных спутников?
10. Перечислите основные составляющие бюджета погрешностей спутниковой навигационной системы и аппаратуры потребителей, определяющей точность нахождения текущих координат места.
11. Перечислите эталонные средства определения навигационных параметров, использованные в лабораторной работе.

12. К какому типу относятся гироскопы, применённые в ИИМ рассматриваемой системы?

4.2. Лабораторная работа № 2 «Исследование алгоритмов работы и анализ точности СНС-компаса «ИСОИ-1», построенного по сильносвязанной схеме в части использования фазовых измерений при решении задачи ориентации»

Цель работы: в изучении состава, структуры построения и анализ точности интегрированной системы разработки ЦНИИ «Электроприбор»: СНС-компаса «ИСОИ-1» на микроэлектромеханических датчиках, включая анализ в пакете MATLAB(Simulink) дискретных алгоритмов работы этой системы и характеристик точности с использованием результатов стендовых и мореходных испытаний. Изучение особенностей функционирования сильносвязанной (в части решения задачи ориентации) ИСОИ в условиях наблюдения множества НС и ограниченного числа НС. Изучение особенностей имитационной модели сильносвязанной системы на ДУС.

4.2.1. Описание лабораторной установки, массивов исходных данных и программ для их чтения и обработки

Лабораторная работа построена на основе стендовых и мореходных испытаний ЭО СНС-компаса «ИСОИ-1», описание которого приведено в разделе 3.2.

Массивы данных стендовых испытаний СНС-компаса формируются студентами в процессе выполнения лабораторной работы в соответствии с методикой, приведенной в приложении ПЗ.

Массивы данных мореходных испытаний используются из записанных ранее результатов проведенных испытаний СНС-компаса «ИСОИ-1» на исследовательском судне «Азимут» на Ладожском озере и включают:

- данные гироскопов и акселерометров ИБ БИИМ на частоте 100 Гц (массив AGm) с учётом реальной задержки относительно импульса PPS1;
- значения координат, скорости и времени (КСВ - решение) по сигналам СНС с частотой 1 Гц от спутникового приемника фирмы «РИРВ», привязанные к импульсу PPS1; значения путевого угла по данным спутникового приемника (массив s1_1);
- значения первых разностей фаз в единицах дальности для каждого из десяти наблюдаемых НС, привязанные к импульсу PPS1, (массив df1_sv), значения их азимутов и высот (массивы az_sv1p, elev_sv1p), номера спутников (массив nmb_sv1p), эфемеридная информация для каждого НС_i (массивы X,Y,Z) от приёмников СНС фирмы «РИРВ» на частоте 10 Гц;
- данные для эталонирования. В качестве эталонных систем использовались ИИМ IMU-120 ф. IXblue, спутниковая аппаратура ф. Javad и ИСОИ «Вега» (ЦНИИ "Электроприбор") с измерительным модулем на ВОГ и двухантенной ПА СНС с разнесением антенн на базе около 19м (массивы xmr, kurt).

Используемое программное обеспечение (модели ISON_real_phase_P2 и ISON_real_phase_P3):

а) для обработки мореходных испытаний

- *crt_vekt_02.m; range_number_03.m;*
- *loader_Ladoga300809ZfSL_Em_NS10_mazhNS.m;*
- *IS26re41_MMGL_10NS_2ZfdatXo_Lad_300809gb.m;*
- *IS26re515aEm3_MMGL_10NS_2Zf_Xo_Lad.mdl.*

б) для обработки стендовых испытаний

- *crt_vekt_02.m; range_number_03.m, ambiguitt_find.m;*
- *prsm_ison_sns.m; extract_snsvega4.m; into_0_360.m; read_bin_ison4.m;*
- *loader_ison1_12NS_GLGP.m;*
- *IS26re41_MMGL_12NS_2ZfdatXo.m;*
- *IS26re515aEm3_MMGL_12NS_2Zf_Xo.mdl.*

описание которого приведено в приложении П1, глава 5.

Примечание – В ходе испытаний на Ладожском озере спутниковой аппаратурой формировались данные только по НС GPS. При стендовых испытаниях ИСОН-1 фазовые измерения формируются как по данным НС GPS, так и ГЛОНАСС в диапазоне L1 (с учётом литерных частот НС ГЛОНАСС).

4.2.2. Порядок выполнения лабораторной работы

А) Действия оператора (при обработке данных мореходных испытаний):

1а. Запустить программу MATLAB (версия не ниже 7.3) (ярлык программы  находится на «Панели задач»), в окне «Current Directory» указать путь к рабочей папке C:\LAB_ISON_silnos\lab_2\ISON_real_phase_P2

2а. Открыть файл loader_Ladoga300809ZfSL_Em_NS10_mazhNS.m (для этого нажать ) и загрузить его данные в рабочую область Workspace MATLAB, нажав кнопки Debug→Run.

3а. Открыть файл IS26re41_MMGL_10NS_2ZfdatXo_Lad_300809gb.m и загрузить его данные в рабочую область Workspace MATLAB.

4а. После того, как все необходимые переменные загружены в рабочую область, необходимо войти в пакет Simulink, щелкнув в окне MATLAB по иконке  запуска основного окна Simulink. А затем клик по значку  в окне Simulink.

5а. Открыть в пакете Simulink файл IS26re515aEm3_MMGL_10NS_2Zf_Xo_Lad.mdl.

Проверить наличие файлов crt_vekt_02.m, range_number_03.m в рабочей директории.

6а. Указать в меню настроек Simulation → Simulation Parameters значение параметра Stop time, равное Time_end (в секундах), а также шаг дискретности (dt) и численный алгоритм интегрирования (Euler). Значения Time_end и dt приведены в соответствующих файлах *.m.

7а. Произвести настройку модели для реализации обсервационного режима работы ИСОН без использования фазовых измерений. Для этого войти в блок (subsystem) $u(k)_{FK_N}$ и отключить из обработки измерения zsi_j от всех НС, курсовое измерение Z_K и данные лага Z_L , используя ключи (Manual Switch) 11,8,9,4,5 и 3,2. Соответственно используемым измерениям сформировать матрицу H . Для этого в блоке $u(k)_{FK_N}$ воспользоваться ключом (Manual Switch) 14 и блоком, задающим матрицу H_const .

8а. Затем задать в блоках To File записи результатов моделирования (группа 9 блоков модели, см. Приложение П1, глава 5) соответствующее имя файла *.mat, например Or_LC_23vs_.mat.

9а. Запустить процесс обработки массива данных, нажав кнопки Simulation→Start (или кнопку  на панели инструментов в окне Simulink-модели IS26re515aEm3_MMGL_10NS_2Zf_Xo_Lad.mdl).

10а. После окончания моделирования построить с использованием программ plot_Or_s.m, plot_dK_PU.m, plot_CDr.m, plot_POr.m, plot_NKA, plot_Ashs по значениям, записанным в соответствующие file.mat, графики погрешностей системы по параметрам ориентации и путевому углу, а также оценкам дрейфов гироскопов для обсервационного режима работы ИСОН без использования фазовых измерений, номера НС, распределения высот и азимутов наблюдаемых НС. Графики необходимо внести в отчёт.

11а. Повторить п.п. 2.7а-2.10а при работе ИСОН в обсервационном режиме с использованием фазовых измерений от: а) первых двух НС; б) первых четырех НС. При этом каждый раз в блоке $u(k)_{FK_N}$ формировать соответствующую используемым измерениям матрицу H . Для этого необходимо изменить вход блока Goto37, используя ключи 7,13,14.

После окончания каждого режима моделирования построить с использованием программ plot_Or_s.m, plot_dK_PU.m, plot_CDr.m, plot_POr.m, plot_PCDr.m, plot_CDf.m и plot_PCDf.m по значениям, записанным в соответствующие файлах *.mat, графики погрешностей системы по параметрам ориентации и путевому углу, а также оценкам дрейфов и неоднозначностей фазовых измерений. Графики необходимо внести в отчёт.

Б) Действия оператора (при обработке данных стендовых испытаний):

1б. Запустить программу MATLAB (версия не ниже 7.3) (ярлык программы  находится на «Панели задач»), в окне «Current Directory» указать путь к рабочей папке C:\LAB_ISON_silnos\lab_2\ISON_real_phase_P3.

2б. Проверить наличие файлов prsm_ison_sns.m; extract_snsvega4.m; into_0_360.m; read_bin_ison4.m в рабочей директории.

3б. Открыть файл loader_ison1_12NS_GLGP.m (для этого нажать ). Указать в данном загрузочном файле имя файла данных СНС-компаса ИСОН-1: ***_ison.bin и ***_sns.bin. Имя файла в поле *** задается переменной "name" (строка 28 загрузочного файла) в том виде, какой был обозначен при записи файлов данных ИСОН-1 (см. П3. Методика записи и формирования исходных данных при стендовых испытаниях СНС-компаса «ИСОН-1»). Далее необходи-

мо загрузить данные, содержащиеся в loader_ison1_12NS_GLGP, в рабочую область Workspace MATLAB, нажав кнопки Debug→Run.

4б. Открыть файл IS26re41_MMGL_12NS_2ZfdatXo.m и загрузить его данные в рабочую область Workspace MATLAB.

5б. После того, как все необходимые переменные загружены в рабочую область, необходимо войти в пакет Simulink, щелкнув в окне MATLAB по иконке  запуска основного окна Simulink. А затем клик по значку  в окне Simulink.

6б. Открыть в пакете Simulink файл IS26re515aEm3_MMGL_12NS_2Zf_Xo.mdl.

Проверить наличие файлов crt_vekt_02.m, range_number_03.m в рабочей директории.

7б. Указать в меню настроек Simulation → Simulation Parameters значение параметра Stop Time, равное Time_end (с), а также шаг дискретности (dt) и численный алгоритм (Euler) интегрирования. Значения Time_end и dt приведены в соответствующих файлах *.m.

8б. Произвести настройку модели для реализации обсервационного режима работы ИСОН без использования фазовых измерений. Для этого войти в блок (subsystem) u(k)_FK_N и отключить из обработки измерения zsi_j от всех HC_i, курсовое измерение Z_K и от лага Z_L, используя ключи (Manual Switch) 11,8,9,4,5 и 3,2. Соответственно используемым измерениям сформировать значение матрицы H. Для чего в блоке u(k)_FK_N воспользоваться ключом (Manual Switch) 14 и соответствующим формированием матрицы H_const.

9б. Задать в блоках To File записи результатов моделирования (группа 9 блоков модели, см. Приложение П1, глава 5) соответствующее имя файла *.mat, например Or_LC_23vs_.mat.

10б. Запустить процесс обработки массива данных, нажав кнопки Simulation→Start (или кнопку  на панели инструментов в окне Simulink-модели IS26re515aEm3_MMGL_12NS_2Zf_Xo.mdl).

11б. После окончания моделирования построить с использованием программ plot_Or_s.m, plot_dK_PU.m, plot_CDr.m, plot_POr.m, plot_NKA, plot_AsNs, plot_df2s по значениям, записанным в соответствующие file.mat, графики погрешностей системы по параметрам ориентации и путевому углу, а также оценкам дрейфов гироскопов для обсервационного режима работы ИСОН без использования фазовых измерений, номера HC, распределения высот и азимутов наблюдаемых HC, вторые разности фаз спутниковой аппаратуры. Графики необходимо внести в отчет.

12б. Повторить п.п. 2.7б-2.10б при работе ИСОН в обсервационном режиме с использованием фазовых измерений от: а) первых 2-х; б) 5-и пар HC. При этом каждый раз в блоке u(k)_FK_N формировать соответствующую используемым измерениям матрицу H. Для этого необходимо изменять вход блока Goto37, используя ключи 7,10,14.

После окончания каждого режима моделирования построить с использованием программ plot_Or_s.m, plot_dK_PU.m, plot_CDr.m, plot_POr.m,

plot_PCDr.m, plot_CDf.m и plot_PCDf.m по значениям, записанным в соответствующие файлы *.mat, графики погрешностей системы по параметрам ориентации и путевому углу, а также оценкам дрейфов и неоднозначностей фазовых измерений. Графики необходимо внести в отчёт.

4.2.3. Содержание отчёта

Отчёт о выполненных исследованиях по обеим частям работы должен включать:

1. Краткое описание структуры и состава СНС-компаса «ИСОИ-1», массивов данных испытаний, средств эталонирования.
2. Анализ результатов работы СНС-компаса при решении задачи ориентации в обсервационном режиме с использованием и без использования фазовых измерений от НС.
3. Уровень погрешностей по параметрам ориентации в различных режимах работы СНС-компаса, систематических дрейфов ММГ и ВОГ, неоднозначностей фазовых измерений и оценку их наблюдаемости (по анализу работы ковариационного канала ФК).
4. Номера НС ГЛОНАСС и GPS и соответствующие им траектории движения спутников, их азимуты и высоты.

4.2.4. Контрольные вопросы

1. Дайте краткое описание особенностей системы, называемой СНС-компас.
2. Что такое интерферометрический принцип применительно к СНС-компасам?
3. Чем отличаются сигналы с кодовым и частотным разделением? К какому из обозначенных типов сигналов относятся сигналы ГНСС ГЛОНАСС и GPS?
4. Что такое фронт волны и почему его можно считать "плоским" применительно к электромагнитным волнам сигналов ГНСС, принимаемым у поверхности Земли?
5. Можно ли определить курс объекта по наблюдаемому навигационному спутнику, применяя методы радиопеленгации?
6. Что такое литерная частота применительно к сигналам ГНСС ГЛОНАСС?
7. Дать характеристики литерных частот: шаг и пределы изменения, номер частоты.
8. Каким образом и на основании какой информации определяются расчётные значения разностей фаз приёмных спутниковых антенн?
9. Что такое первые, вторые и третьи разности фаз? Дайте их краткую характеристику и варианты использования применительно к задаче определения ориентации объекта интегрированной системой?

10. Что такое неоднозначность фазовых измерений и каковы её причины?

11. Перечислите подходы, позволяющие определять и исключать неоднозначности фазовых измерений, их преимущества и недостатки.

12. Каковы основные источники погрешностей фазовых измерений (определений)?

4.3. Лабораторная работа № 3 "Решение задачи ориентации с использованием магнитометров измерительного блока «ИСОИ-2»"

Цели работы:

- Исследование алгоритмов решения задачи ориентации ИСОИ.
- Анализ погрешностей выработки магнитного курса и курса по данным ИСОИ.

4.3.1. Описание лабораторной установки и программ для чтения и обработки данных

Лабораторная установка состоит из ИБ «ИСОИ-2», блока питания, персонального компьютера (ПК), ноутбука, кабеля соединяющего ИБ с ПК и поворотного стола. ИБ передает информацию на ПК через последовательный интерфейсный порт RS-232.

В таблице 1 приведено ПО (модель ISON_real_magnit_P4), требующееся для выполнения лабораторной работы.

№	Название	Описание
1	<i>loader_ison2_magn.m</i>	Считывает массивы из текстовых файлов в рабочую область MATLAB
2	<i>loader_MK_221212New10kal.m</i>	Загружает в рабочую область MATLAB необходимые константы для режима калибровки
3	<i>IS7re_MK_Ket_New10kal.mdl</i>	Выполняет моделирование алгоритма работы режима калибровки
4	<i>IS25remod_Seaph_dat_St020512f.m</i>	Загружает в рабочую область MATLAB необходимые константы для рабочего режима
5	<i>IS25remod_New2_Seaph_St_Kru.mdl</i>	Выполняет моделирование алгоритма работы рабочего режима
6	<i>plot_FKAh.m, plot_FKCDr.m, plot_Or.m, plot_Kmk.m, plot_DK.m</i>	Программы построения графиков
7	<i>ComTest.exe</i>	Чтение данных с последовательного интерфейсного порта RS-232

4.3.2. Порядок выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа разбита на два этапа. Первый этап включает в себя изучение алгоритмов калибровки магнитометров на поворотном столе. Второй этап заключается в изучении алгоритмов работы интегрированной системы ориентации и навигации в части решения задачи ориентации с опорой на данные от магнитометров.

Для выполнения первого этапа работы потребуется получить данные от гироскопов, акселерометров и магнитометров системы «ИСОИ-2», а также эталонные данные об углах ориентации, выработанные системой «ИСОИ-2». Затем вычислить значения аномалий магнитного поля в лабораторном корпусе и смещения нулей магнитометров, используя алгоритмы калибровки магнитометров, разработанные в пакете программ MATLAB (Simulink).

Для выполнения второго этапа работы потребуется получить данные от гироскопов, акселерометров и магнитометров системы «ИСОИ-2», а также эталонные данные об углах ориентации, выработанные системой «ИСОИ-2». Затем, используя значения аномалий магнитного поля, смещения нулей магнитометров, а также алгоритмы работы ИСОИ, разработанные в пакете программ MATLAB (Simulink), вычислить магнитный курс и курс, полученный на выходе ИСОИ. Сравнить полученные значения с эталонным курсом, полученным от системы «ИСОИ-2».

А) Описание первой части лабораторной работы

Действия оператора:

- 1а. Включить ПК.
- 2а. Включить блок питания.
- 3а. С помощью квадранта установить поворотный столик в плоскость горизонта, а угол по курсу установить на нулевую отметку.
- 4а. Через 10 минут после включения блока питания, запустить программу ComPort.exe и начать запись данных в диалоговое окно.
- 5а. Медленно поворачивая поворотный стол, развернуть ИИМ на 360°.
- 6а. Повторить п. 3.5а.
- 7а. Создать текстовый файл data1.txt и скопировать в него данные из окна программы ComPort.exe.
- 8а. Открыть MATLAB. Открыть и запустить программу loaderMRU.m, указав директорию и имя файла с сохраненными данными.
- 9а. Открыть и запустить файл loader_MK_221212New10kal.m с сохраненными константами.
- 10а. Открыть пакет Simulink и запустить модель IS7re_MK_Ket_New10kal.mdl.
- 11а. По окончании моделирования построить графики с помощью файлов plot_FKAh.m, plot_FKDTxyz.m, plot_PAh.m, plot_PDTxyz.m,
- 12а. Оценить по графикам значения аномалий магнитного поля и смещений нулей магнитометров.

Б) Описание второй части лабораторной работы

Действия оператора:

1б. Установить поворотный столик, используя квадрант, в плоскость горизонта, а угол по курсу установить на нулевую отметку.

2б. Запустить программу ComPort.exe.

3б. Начать запись данных в диалоговое окно.

4б. Наклонить поворотный стол на угол 10° .

5б. Медленно поворачивая поворотный стол, развернуть ИИМ на 360° .

6б. Повторить пункт 3.5б.

7б. Создать текстовый файл data2.txt и скопировать в него данные из окна программы ComPort.exe.

8б. Открыть MATLAB. Открыть и запустить программу loaderMRU_2.m, указав директорию и имя файла с сохраненными данными.

9б. Открыть и запустить файл IS25remod_Seaph_dat_St020512f.m с сохраненными константами.

10б. Открыть пакет Simulink и запустить модель IS25remod_New2_Seaph_St_Kru.mdl.

11б. По окончании моделирования построить графики с помощью файлов plot_Or.m, plot_Kmk.m, plot_DK.m.

12б. Оценить по графикам значения погрешностей выработки углов тангажа и крена, а также погрешность выработки курса.

4.3.3. Содержание отчёта

Отчет о выполненных исследованиях по обеим частям работы должен включать:

1. Краткое описание назначения, структуры и состава «ИСОИ-2».
2. Постановку задачи калибровки магнитометров и алгоритм вычисления курса магнитного, описание массивов данных испытаний, средств эталонирования.
3. Результаты обработки данных испытаний: оценки аномалий магнитного поля и смещений нулей магнитометров.
4. Результаты анализа наблюдаемости смещений нулей магнитометров и аномалий магнитного поля (по анализу работы ковариационного канала ФК), оценку точности выработки курса магнитного.

4.3.4. Контрольные вопросы

1. Перечислите разностные измерения при совместной обработке с использованием ФК данных БИИМ, лага и магнитометров.
2. Опишите алгоритм выработки магнитного курса.
3. Опишите измерения, которые могут быть использованы для оценки смещения нулей магнитометров.
4. Перечислите эталонные средства, использованные в лабораторной работе.

5. РУКОВОДСТВО ПО РАБОТЕ С ИМИТАЦИОННЫМИ МОДЕЛЯМИ ИСОИ

5.1. Имитационные модели ИСОИ

В руководстве представлены три имитационные модели ИСОИ. Файлы для работы с ними размещены в соответствующих папках:

- ISON_mod_dRoRo_phase_P1 (далее Приложение П1);
- ISON_real_dRoRo_P2 (далее Приложение П2);
- ISON_real_phase_P3 (далее Приложение П3).

Каждая из имитационных моделей реализует следующее программно-математическое обеспечение (ПМО) ИСОИ:

П1: Программное обеспечение в среде MATLAB(Simulink) для имитационного моделирования алгоритмов работы ИСОИ, содержащей БИИМ на ВОГ или ММГ и мультиантенную ПА СНС и построенной по сильносвязанной схеме, для решения как навигационной задачи, так и задачи ориентации с использованием фазовых измерений СНС.

П2: Программное обеспечение в среде MATLAB(Simulink) для обработки реальных данных испытаний ИБ БИИМ на ВОГ или ММГ и ПА СНС по алгоритмам ИСОИ, построенной по сильносвязанной схеме, для решения навигационной задачи.

П3: Программное обеспечение в среде MATLAB(Simulink) для обработки реальных данных испытаний ИБ БИИМ на ВОГ или ММГ и двухантенной ПА СНС по алгоритмам ИСОИ, построенной по сильносвязанной схеме, для решения задачи ориентации с использованием фазовых измерений СНС.

Работа с указанными имитационными моделями возможна в MatLab (Simulink), начиная с версий *MatLab 7.3.0.267 (R2006b) (Simulink 6.5 (R2006b))*.

Указанные папки с имитационными моделями ИСОИ содержат следующие группы файлов:

- файлы plot_*.m, предназначенные для просмотра результатов моделирования и представления их в виде соответствующих графиков;
- все остальные файлы *.m (кроме plot_*.m), предназначенные для задания начальных условий проведения моделирования, загрузки массивов реальных данных, задания специальных функций преобразования входных данных;
- файлы *.mdl соответствующих имитационных моделей, реализованных в среде Simulink.

Алгоритмы работы ИСОИ, построенной по принципам слабосвязанного и сильносвязанного комплексирования ИИМ и ПА СНС, подробно описаны разделах настоящего пособия.

5.2. Технология моделирования

Моделирование проводится в пакете прикладных программ (ППП) MatLab (Simulink).

Перед началом моделирования необходимо запустить программу MatLab, после чего в рабочем окне программы выбрать каталог, в котором находится соответствующая имитационная модель (см. рис.5.1, 5.2).

На рис.5.1 стрелками обозначены рабочий каталог (например, D:\ISON_mod_dRoRo_phase_P1) и кнопка выбора рабочего каталога. На рис.5.2 в разделе меню *Desktop* обозначены (маркерами) необходимые для работы вспомогательные окна ППП MatLab: *Command Window* (диалоговое окно, позволяющее вводить необходимые команды, отображать текущее состояние выполнения программ MatLab (Simulink) и содержание переменных, находящихся в области *Workspace*), *Workspace* (область хранения переменных, используемых в текущем сеансе работы MatLab(Simulink)), *Current Folder* (область, в которой отображаются все файлы рабочего каталога).

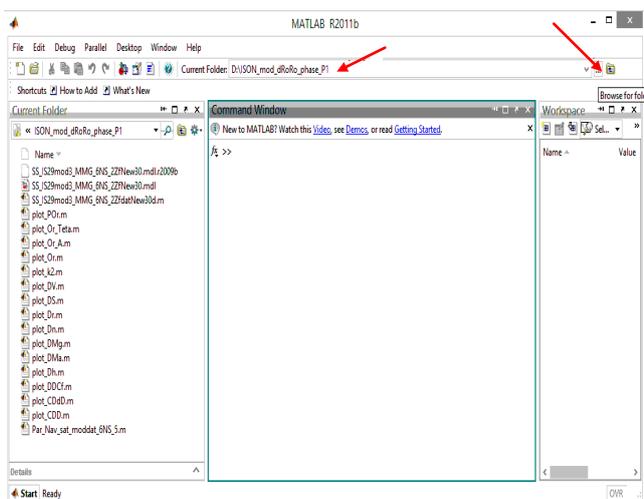


Рис.5.1 Выбор рабочего каталога в MatLab

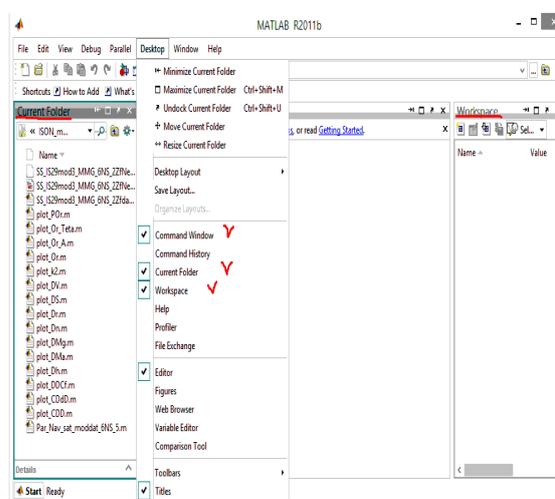


Рис.5.2 Определение состава активных окон

Далее (в зависимости от имитационной модели ИСОН: П1, П2, П3) необходимо открыть (меню **File** или кнопка , или двойной клик на имени файла в окне *Current Folder*) соответствующий загрузочный *.m-файл и запустить его, загрузив таким образом необходимый массив данных в область *Workspace* (рис.5.3, 5.4).

Все *.m-файлы формируются в текстовом редакторе MatLab и подчиняются синтаксису и правилам языка программирования MatLab (синтаксис языка и наборы необходимых операндов и операций описаны в справочной системе MatLab).

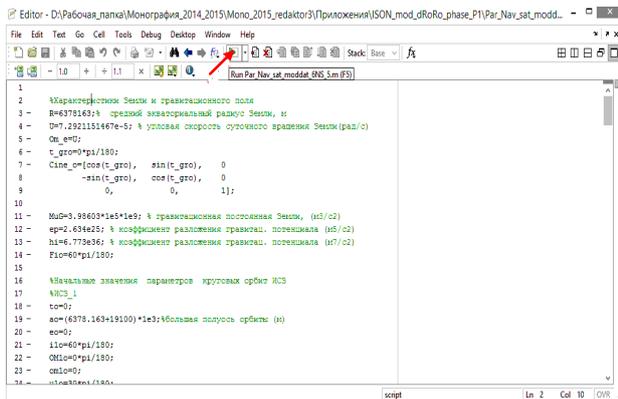


Рис.5.3 Выбор рабочего каталога в MatLab

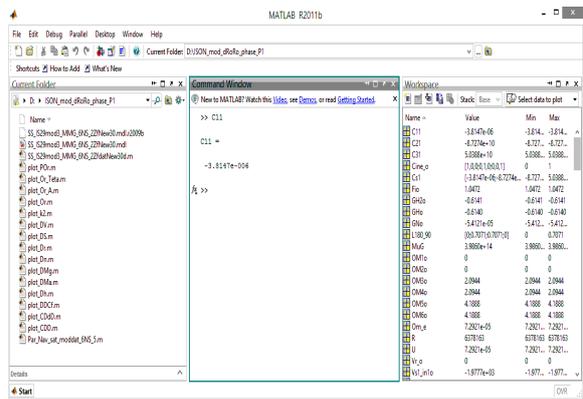


Рис.5.4 Результат выполнения загрузочного файла

Здесь на рис.5.3 приведён фрагмент текста файла Par_Nav_sat_moddat_6NS_5.m из каталога D:\ISON_mod_dRoRo_phase_P1. Стрелкой обозначена кнопка, позволяющая выполнить файл (загрузить файл можно также, нажав клавишу *F5* на клавиатуре компьютера). Результат выполнения файла отображается в окне *Workspace* (рис.5.4). До выполнения файла рабочая область была пуста (рис.5.1). На рис.5.4 стрелкой обозначена переменная *C11* и её значение (после набора имени переменной в области *Command Window* и нажатия клавиши *Enter* на клавиатуре компьютера). Здесь приведён пример загрузки данных одного из необходимых файлов. В рассматриваемых далее примерах имитационных моделей таких файлов может быть несколько.

После того, как все необходимые переменные загружены в рабочую область, необходимо открыть (как это было сделано ранее для *.m-файла) файл собственно имитационной модели в приложении MatLab Simulink – соответствующий файл с расширением *.mdl.

В Simulink реализован принцип "графического" программирования, где графическими объектами являются соответствующие блоки (реализующие ту или иную математическую функцию) и линии связи, позволяющие соединять необходимые входы и выходы блоков.

На рис. 5.5, 5.6 приведено окно открытого файла имитационной модели из папки D:\ISON_mod_dRoRo_phase_P1.

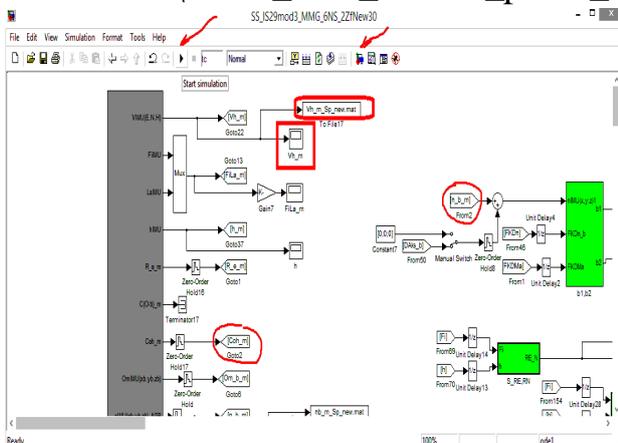


Рис.5.5 Основное окно имитационной модели

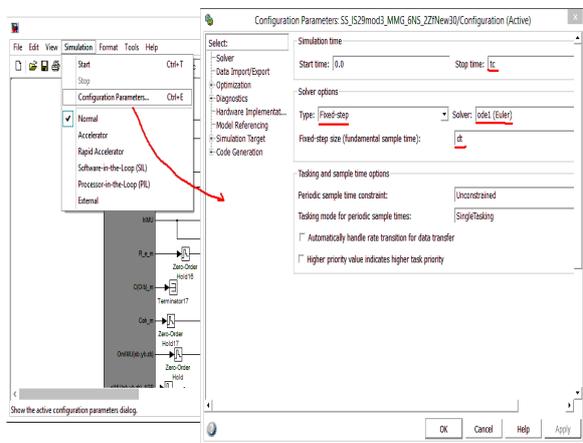


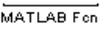
Рис.5.6 Окно настроек имитационной модели

На рис.5.5 стрелкой слева обозначена клавиша  запуска имитационной модели, стрелкой справа обозначена иконка  запуска основного окна Simulink. В данном окне Simulink представлены библиотеки элементарных блоков, которые можно добавлять в существующую имитационную модель путём их перетаскивания из окна Simulink в окно действующей модели. В поле окна рис.5.5 находятся функциональные блоки, принадлежность которых к той или иной группе обозначена цветом. Кружками выделены блоки *Goto* и *From* позволяющие соединять выход того или иного блока (*From*) со входом (*Goto*) другого блока. Данные блоки позволяют избежать излишней загромождённости модели линиями связи.

Следует отметить, что видимые на рис.5.5 блоки представляют собой так называемые subsystemы (subsystem), представляющие собой объединения элементарных блоков или блоков с более низким уровнем доступа к общей памяти модели. Выходы всех блоков (subsystem), видимые в общем пространстве имитационной модели (верхний уровень) доступны как глобальные переменные в других видимых в модели блоках. Глобальными являются также переменные, находящиеся в области *Workspace*. Все переменные, используемые внутри того или иного блока (кроме переменных *Workspace*) являются локальными, и доступны (при отсутствии явного их обозначения как глобальных) только внутри соответствующих блоков (subsystem).

На рис.5.6 показан раздел меню модели *Simulation* и вкладка *Configuration Parameters* с соответствующим окном настройки процесса моделирования. Здесь в качестве настроек выделены время окончания моделирования (*tc*), тип шага моделирования (фиксированный шаг, *Fixed Step*), шаг моделирования (*dt*), тип и порядок алгоритма численного интегрирования (*ode1* – алгоритм Рунге-Кутты первого порядка). Переменные *tc*, *dt* берутся имитационной моделью из области *Workspace* после загрузки соответствующего загрузочного *.m-файла (или файла параметров).

После нажатия клавиши  будет запущен процесс моделирования, о чём будет символизировать режим *Busy* (в левом нижнем углу окна модели, при открытии окна модели по умолчанию она находится в режиме *Ready*) и изменение текущего времени моделирования (в низу окна модели).

В ходе моделирования в некоторые из блоков модели вида  вызывают необходимые функции, описанные соответствующими *.m файлами: как файлами системных библиотек ППП MatLab, так и созданными пользователем функциями, тело которых находится в одном из *.m файлов, находящегося в рабочем каталоге. Пример внутреннего содержания блока  приведён на рис.5.7.

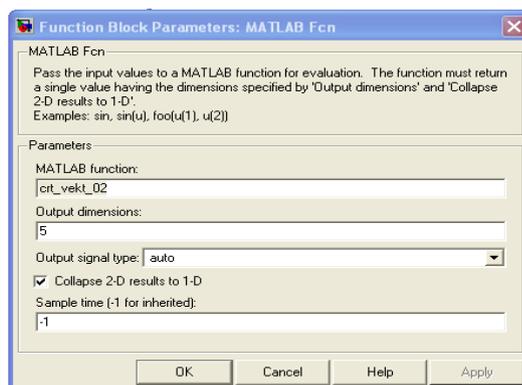


Рис.5.7 Вызов необходимой функции по названию соответствующего *.m файла

Здесь в качестве вызываемого *.m файла выступает файл `crt_vekt_02.m` функции извлечения нужного набора данных из массива, находящийся в каталоге `ISON_real_phase_P3`.

В процессе моделирования пошагово будут выполняться алгоритмы, заложенные в соответствующих блоках модели. При этом на каждый шаг будет затрачено столько машинного времени компьютера, сколько требуется для завершения самой ресурсоёмкой задачи ИСОН (модели ИСОН). Настройка системы на синхронное выполнение задач осуществляется в окне *Configuration Parameters* параметром *SingleTasking* (см. рис.5.6). Частота обновления данных той или иной задачи (но не выше максимально возможной в модели частоты $1/dt$) обуславливается соответствующим шагом дискретизации её выполнения: dt – шаг дискретизации показаний инерциальных ЧЭ; dT – шаг выполнения основных функциональных задач системы (задачи ориентации и навигации, вычисления нормальной силы тяжести и др.); $dT1$, Tz – шаг дискретизации данных спутниковой навигационной аппаратуры и выполнения задачи калмановской фильтрации соответственно. При этом в модели реализован следующий принцип: в случае, если в том или ином блоке явно не обозначен шаг дискретизации, то он "наследуется" от блока, с выхода которого данные приходят на вход данного блока.

Результат моделирования можно отслеживать в процессе моделирования в соответствующих осциллоскопах (квадратная красная область на рис.5.5) и после завершения моделирования по данным файлов данных (*.mat-файлам) (блок *To file*, овальная красная область на рис.5.5). Файлы данных *.mat сохраняются на жёсткий диск компьютера в тот же каталог, в котором находятся файлы модели (соответствующие *.m и *.mdl-файлы).

Просмотр результатов моделирования после его выполнения производится после прочтения файлов данных MatLab (*.mat-файлов) с помощью специальных программ (файлов `plot_*.m`). Открывая соответствующие файлы `plot_*.m` способом, описанным ранее, и запуская их на выполнение можно оценить результаты моделирования, анализируя соответствующие графики, выводимые при выполнении каждого из подобных файлов.

6. МЕТОДИКА ЗАПИСИ И ФОРМИРОВАНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ СНС-КОМПАСОВ «ИСОИ-1» И «ИСОИ-2»

6.1 Методика записи и формирования исходных данных при стендовых испытаниях СНС-компаса «ИСОИ-1»

6.1.1 Подключение оборудования

ВНИМАНИЕ!

Подключение оборудования выполняет лаборант или заведующий лабораторией.

Перед подключением оборудования следует убедиться, что антенный модуль СНС-компаса установлен на крыше лабораторного корпуса, а антенные кабели выведены в помещение лаборатории.

1. Для обработки данных СНС-компаса понадобится:

- СНС-компас «ИСОИ-1» с антеннами, размещенными на крыше лабораторного корпуса и необходимым комплектом кабелей (два антенных кабеля – X5 и X6, кабель питания – X7, кабель информационного обмена – X2);
- источник постоянного тока;
- ноутбук с программным обеспечением Vega.exe;
- кабель-адаптер USB AM - COM DB9M - RS232 (далее – кабель-адаптер).

Внешний вид центрального прибора СНС-компаса «ИСОИ-1» приведён на рис. 6.1.



Рис. 6.1. Внешний вид СНС-компаса «ИСОИ-1» без антенного модуля

2. Подключить антенные кабели X5 и X6 к разъёмам на корпусе СНС-компаса согласно рисунку 2.

3. Подключить кабель питания X7 к разъёму на корпусе СНС-компаса согласно рис. 6.2.



Рис. 6.2. Подключенные антенные кабели (X5 и X6) и кабель питания к СНС-компасу

4. Подключить кабель информационного обмена X2 к разъёму на корпусе СНС-компаса согласно рис. 6.3.



Рис. 6.3. Подключенный кабель информационного обмена к СНС-компасу

5. Подключить кабель информационного обмена (X2) к кабель-адаптеру (рис. 6.4), а кабель-адаптер подключить к USB-порту ноутбука, как указано на рис. 6.5.



Рис. 6.4. Соединение кабель-адаптера с кабелем информационного обмена СНС-компаса (X2)

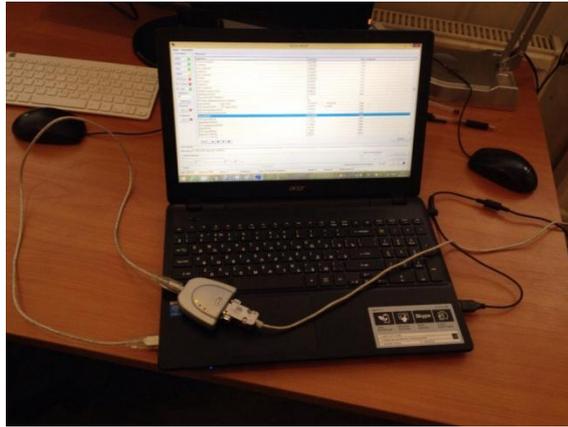


Рис. 6.5. Соединение кабель-адаптера с ноутбуком

6. Включить источник постоянного тока и установить на нем напряжение 24 В (рис. 6.6).



Рис. 6.6. Источник постоянного тока

7. Подсоединить к положительной клемме источника постоянного тока положительную клемму кабеля питания (X7) СНС-компаса (рис. 6.7).

Затем к отрицательной клемме источника постоянного тока подсоединить отрицательную клемму кабеля питания (X7) СНС-компаса (рис. 6.7). Проверить, чтобы индикатор «27 В» загорелся зеленым цветом (рис. 6.2).



Рис. 6.7. Подключение кабеля питания (X7) СНС-компаса к источнику питания

6.1.2 Методика записи и формирования исходных данных

ВНИМАНИЕ!

Запись данных выполняют студенты.

Перед выполнением методики записи и формирования данных убедиться, что выполнено подключение оборудования по п.6.1.1.

1. Включить ноутбук.

2. Запустить программу Vega.exe (программа находится в каталоге C:\LAB_ISON_silnos\lab_3). На экране монитора должно появиться окно программы Vega (рис. 6.8).

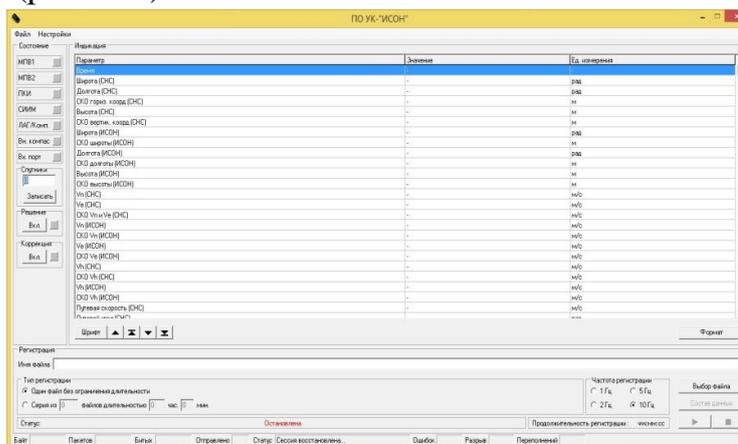


Рис. 6.8. Окно программы Vega

3. В окне программы выбрать вкладку «Настройки», затем выбрать вкладку «Порт», после чего выбрать «COM4» (рис. 6.9). На экране должны появиться значения выходных данных (рис.10). Проконтролировать, чтобы индикаторы «Вх. порт», «МПВ1» и «МПВ2» загорелись зеленым цветом (рис. 6.10).

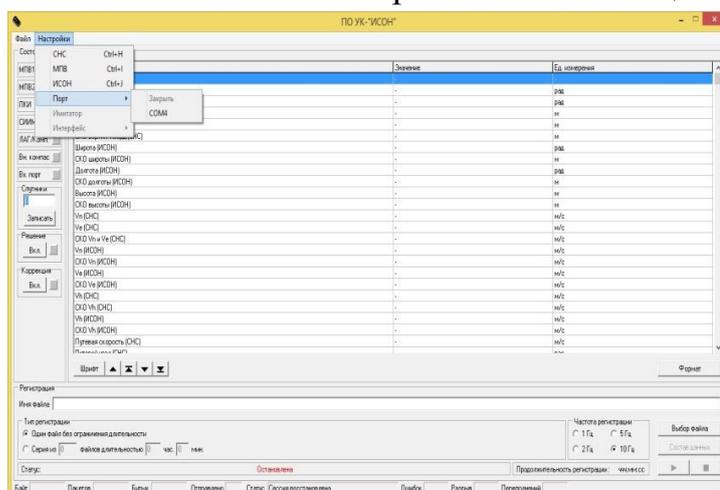


Рис. 6.9. Подключение программы к COM-порту

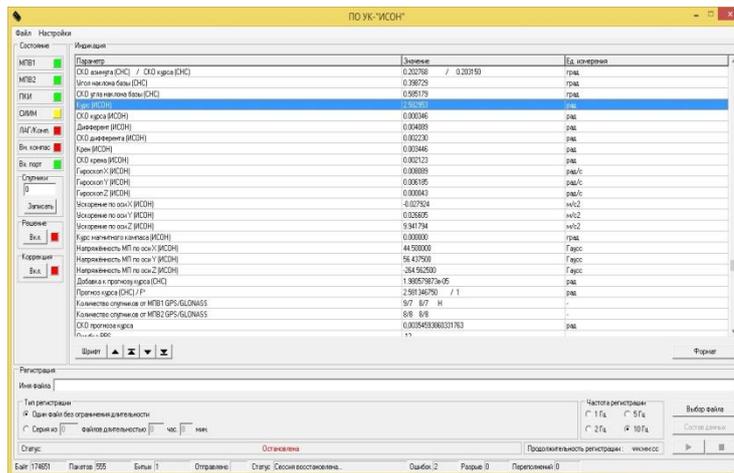


Рис. 6.10. Отображение выходной информации в окне программы Vega

4. В окне программы выбрать кнопку «Формат». Должно появиться окно «Выбор данных для индикации» (рис. 6.11). Напротив графы «Углы ориентации ИСОН» выставить значение «град.» вместо значения «радианы». Нажать кнопку «Применить», затем кнопку «заккрыть».

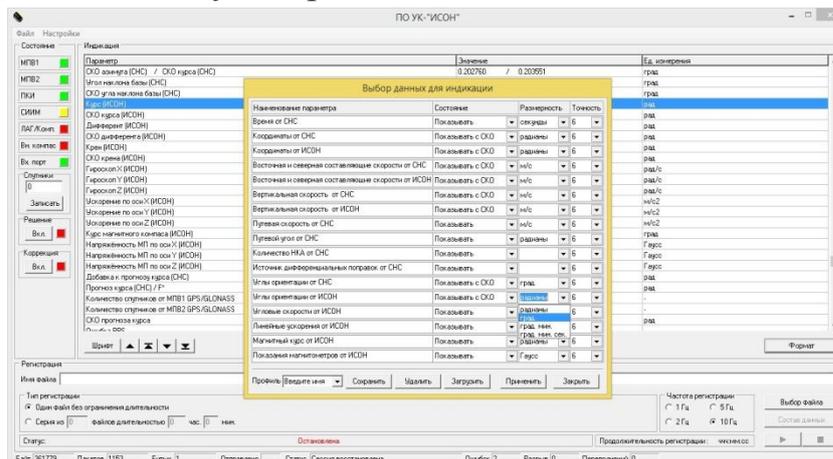


Рис. 6.11. Окно «Выбор данных для индикации»

5. Проконтролировать значение «Курс (ИСОН)» (рис. 6.12). Значение должно лежать в пределах $(147 \pm 5)^\circ$ или $(327 \pm 5)^\circ$ (отличие диапазонов – 180°). Если напротив графы «Курс (ИСОН)» стоит другое значение, обратиться к преподавателю.

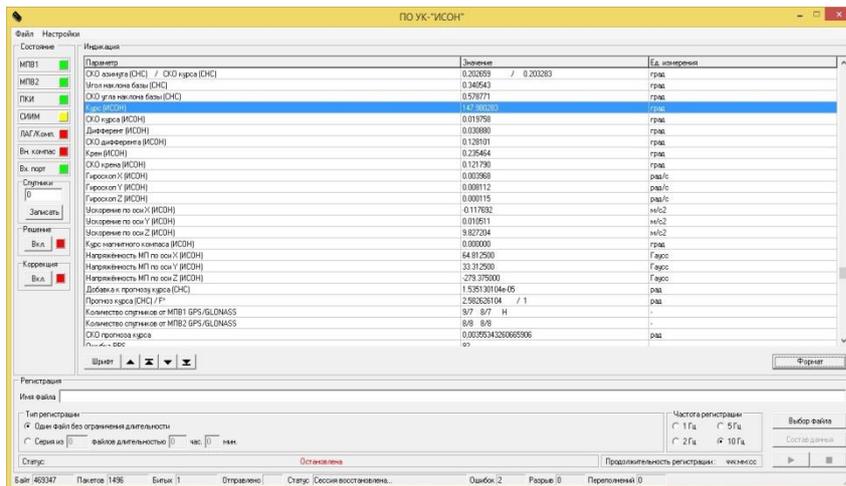


Рис. 6.12. Значение «Курс (ИСОМ)»

6. Выбрать вкладку «Выбор файла». Должно появиться окно «Открыть» (рис. 6.13), в котором выбрать директорию для сохранения данных (C:\LAB_I SON_silnos\lab_3\ISON_real_phase_P3) и задать имя файла в формате: «ЧислоМесяцГод» (например - 280416). Нажать кнопку «Открыть».

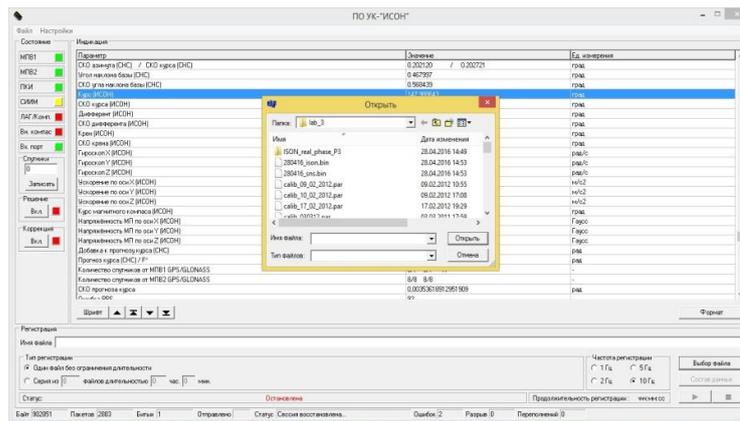


Рис. 6.13. Окно «Открыть»

7. Нажать кнопку . Окно программы должно принять вид, как на рис. 6.14.

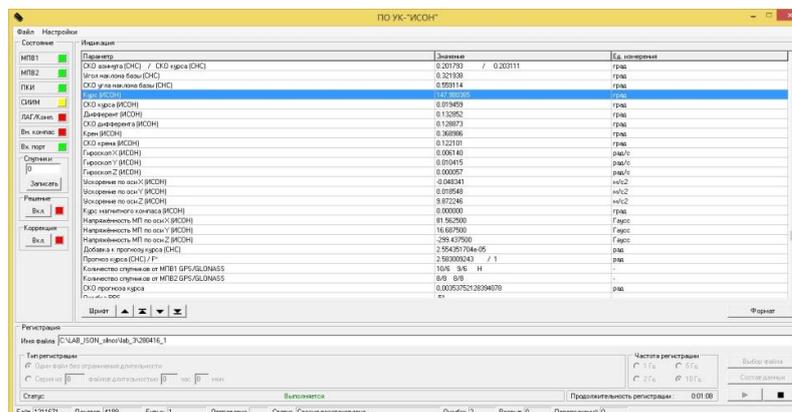


Рис. 6.14. Окно программы при записи данных.

8. Осуществлять запись данных в течение 40 мин.

9. После окончания записи данных нажать кнопку  (рис. 6.14). Выбрать вкладку «Настройки», затем выбрать «Порт», затем «закрыть» (рис. 6.9). Закройте окно программы.

10. Приступить к обработке данных по методическим указаниям к лабораторной работе. Данные находятся в каталоге: C:\LAB_ISON_silnos\lab_3\ISON_real_phase_P3, Имена файлов: ЧислоМесяцГод_ison.bin и ЧислоМесяцГод_sns.bin (пример: 280416_sns.bin и 280416_sns.bin).

6.1.3 Выключение оборудования

ВНИМАНИЕ!

Выключение оборудования выполняет лаборант или заведующий лабораторией.

1. Выключить источник питания. Выключить ноутбук.
2. Провести отсоединение оборудования в последовательности обратной п.6.1.1.

6.2 Методика записи и формирования исходных данных при стендовых испытаниях СНС-компаса «ИСОИ-1»

6.2.1 Подключение оборудования

ВНИМАНИЕ!

Подключение оборудования выполняет лаборант или заведующий лабораторией.

1. Для обработки данных СНС-компаса «ИСОИ-2» понадобится:
 - измерительный блок СНС-компаса «ИСОИ-2», технологический кабель, который является одновременно кабелем информационного обмена и питания;
 - источник постоянного тока;
 - поворотный-наклонный столик;
 - персональный компьютер (ПК), на компьютере должен присутствовать СОМ-порт;
 - программа СОМ-test.

Внешний вид измерительного блока СНС-компаса «ИСОИ-2» с подсоединенным технологическим кабелем представлен на рис. 6.15.



Рис. 6.15. Внешний вид измерительного блока СНС-компаса «ИСОН-2»

2. Подключить технологический кабель к разъему измерительного блока системы ИСОН-2, как показано на рис. 6.15.
 3. Подключить технологический кабель к СОМ-порту ПК.
 4. Установить измерительный блок системы ИСОН-2 на поворотном-наклонный столик.
 5. Включить ПК.
 6. Включить источник питания постоянного тока и установить значение выходного напряжения 24 В.
 7. Подсоединить к положительной клемме источника постоянного тока положительный разъем технологического кабеля (рис. 6.16).
- Затем к отрицательной клемме источника постоянного тока подсоединить отрицательный разъем технологического кабеля (рис. 6.16).

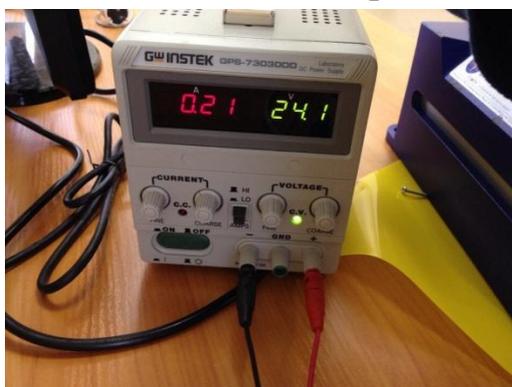


Рис. 6.16. Источник постоянного тока с подключенным к нему технологическим кабелем

6.2.2. Методика записи и формирования исходных данных

ВНИМАНИЕ!

Запись данных выполняют студенты.

Перед выполнением методики записи и формирования данных убедиться, что выполнено подключение оборудования по п.6.2.1.

Лабораторная работа разбита на два этапа:

- калибровка магнитометров;
- решение задачи ориентации интегрированной системой ориентации и навигации с опорой на данные от магнитометров.

А) Запись данных для первого этапа лабораторной работы

1. Запустить программу COM-Test (программа находится в каталоге C:\LAB_ISON_silnos\lab_4\LAB_magn).
2. Выполнить настройку программы COM-Test.
3. Включить запись данных в программе COM-Test.
4. Медленно развернуть поворотный столик на 1080° (три оборота) вокруг вертикальной оси (примерное время разворота – 12 мин).
5. Выключить запись данных в программе COM-Test.
6. Скопировать данные из диалогового окна программы COM-Test в текстовый редактор. Сохранить файл, присвоив ему имя: ***_1_ISON2.txt (вместо *** указывается дата проведения лабораторной работы).
7. Закрыть программу COM-Test.

Б) Запись данных для второго этапа лабораторной работы

1. Запустить программу COM-Test (программа находится в каталоге C:\LAB_ISON_silnos\lab_4\LAB_magn).
2. Выполнить настройку программы COM-Test следующим образом.
3. Включить запись данных в программе COM-Test.
4. Выполнить развороты поворотного столика на углы 10°, 20°, 30°, 60° вокруг вертикальной оси (после каждого поворота делать паузы по 3 мин). Вернуть поворотный столик в начальное положение.
5. Выполнить наклон поворотного столика на угол 10° вокруг продольной оси. Сделать паузу на 3 мин. Вернуть поворотный столик в начальное положение.
6. Выключить запись данных в программе COM-Test.
7. Скопировать данные из диалогового окна программы COM-Test в текстовый редактор. Сохранить файл, присвоив ему имя: ***_2_ISON2.txt (вместо *** указывается дата проведения лабораторной работы).
8. Закрыть программу COM-Test.

6.2.3 Выключение оборудования

ВНИМАНИЕ!

Выключение оборудования выполняет лаборант или заведующий лабораторией.

1. Выключить источник питания. Выключить ПК.
2. Провести отсоединение оборудования в последовательности, обратной п.6.2.1.

Описание имитационной модели ISON_mod_dRoRo_phase_P1

Данная имитационная модель содержит три типа файлов:

- загрузочные *.m-файлы;
- собственно файл имитационной модели *.mdl;
- *.m-файлы просмотра результатов моделирования.

Описание структуры и содержания *.m-файлов с достаточной степенью детализации приведены в соответствующих комментариях в самих файлах. Здесь ограничимся лишь перечислением их состава.

Рассматриваемая имитационная модель содержит два загрузочных script-файла, запускаемых друг за другом в следующем порядке:

1. *Par_Nav_sat_moddat_6NS_5.m*;
2. *SS_IS29mod3_MMG_6NS_2ZfdatNew30d.m*,

а также соответствующие файлы просмотра результатов моделирования (их назначение и выводимые ими результаты следуют из их названия и тех *.mat-файлов, к которым они обращаются).

При повторении моделирования необходимо заново выполнить загрузочные script-файлы, что позволит правильно инициализировать содержащиеся в них глобальные переменные (помеченные оператором *global*).

Далее рассмотрим описание имитационной модели *SS_IS29mod3_MMG_6NS_2ZfNew30.mdl*.

Функциональные блоки имитационной модели условно разбиты на соответствующие группы (от 1 до 9, рис.5).

Кроме того, основные блоки маркированы цветом:

- тёмно-серым обозначены блоки, задающие как движение объекта и эталонные показания инерциальных ЧЭ, так и параметры движения навигационных спутников (их эфемериды), параметры движения антенн ПА СНС, первые разности фазовых измерений двухантенной ПА СНС;

- зелёным обозначены блоки, выполняющие основные функциональные задачи ИСОН (задачу ориентации и навигации, задачу калмановской фильтрации совместной обработки данных ИИМ и ПА СНС);

- оранжевым обозначены блоки вторичной обработки данных, вырабатываемых блоками других групп;

- жёлтым обозначены блоки, предназначенные для отображения результатов моделирования и обработки результатов моделирования с целью более удобного их представления для последующего анализа результатов.

Группы функциональных блоков имеют следующее назначение.

К группе №1 относится только один блок, содержащий алгоритмы формирования эталонных показаний ЧЭ ИИМ, эталонных кинематических параметров движения объекта.

К группе №2 относятся блоки основных функциональных задач ИСОН (задачи ориентации и навигации, задачи совместной обработки данных ИИМ и ПА СНС).

К группе №3 относятся блоки (часть которых частично входит также в группу №2), задающие погрешности инерциальных ЧЭ.

К группе №4 принадлежат блоки формирования эталонных данных по радиальным скоростям и радиальным дальностям относительного движения шести НС и двух антенн ПА СНС, шести спутников и места размещения ИИМ, а также формирования эфемерид шести НС.

К группе №5 относятся блоки формирования измеренных значений псевдодальностей и радиальных скоростей движения навигационных спутников и их расчётных значений.

К группе №6 принадлежат блоки формирования значений первых разностей фаз с учётом их погрешностей, определяемых ПА СНС.

К группе №7 относятся блоки формирования расчётных значений первых разностей фаз.

К группе №8 относятся блоки формирования вторых разностей фаз ПА СНС и их расчётных значений.

К группе №9 относятся блоки индикации результатов моделирования.

Далее приводятся описание входных и выходных переменных блоков каждой из групп.

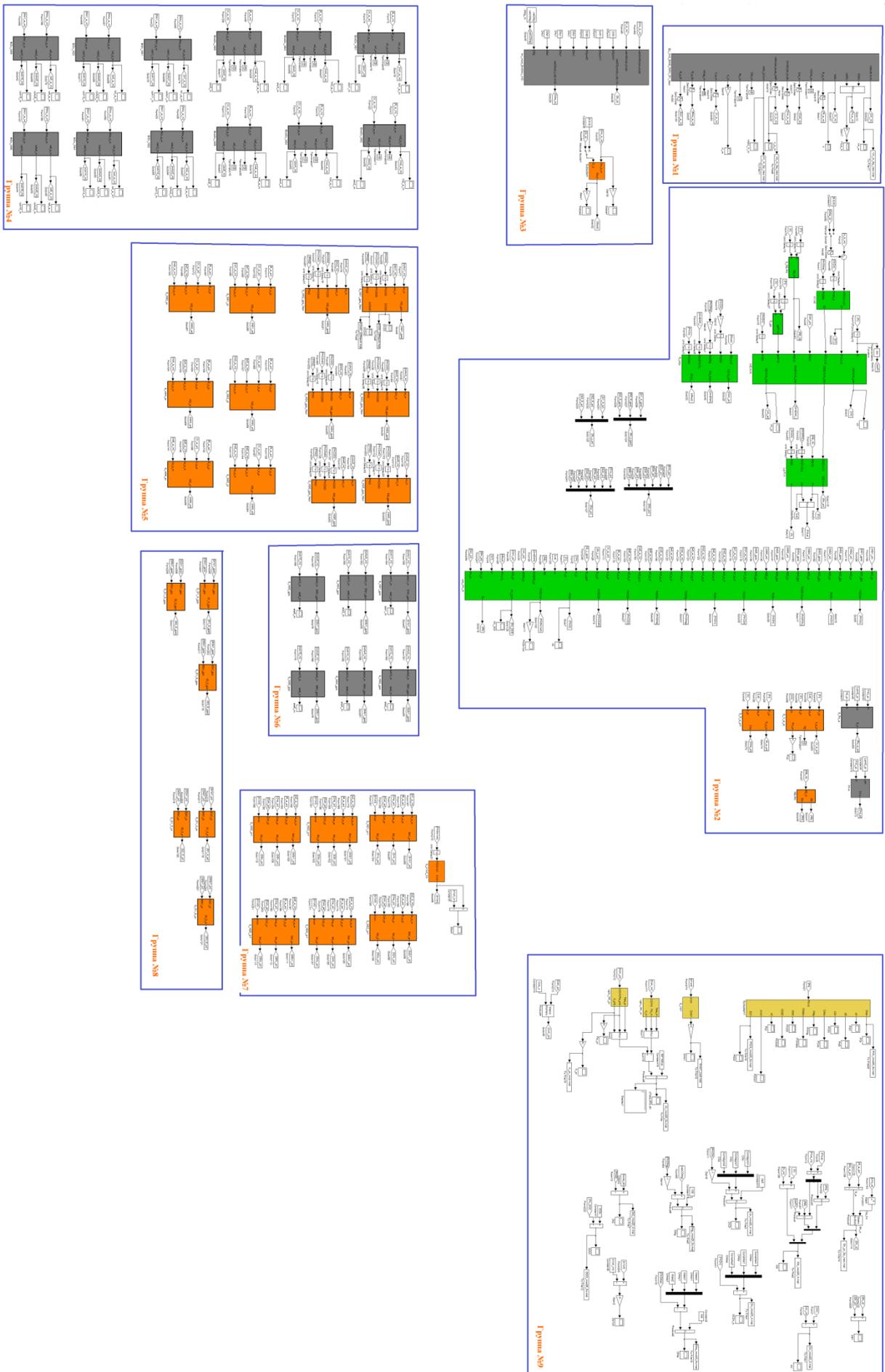


Рис.5 Функциональные блоки имитационной модели ISON_mod_dRoRo_phase_P1

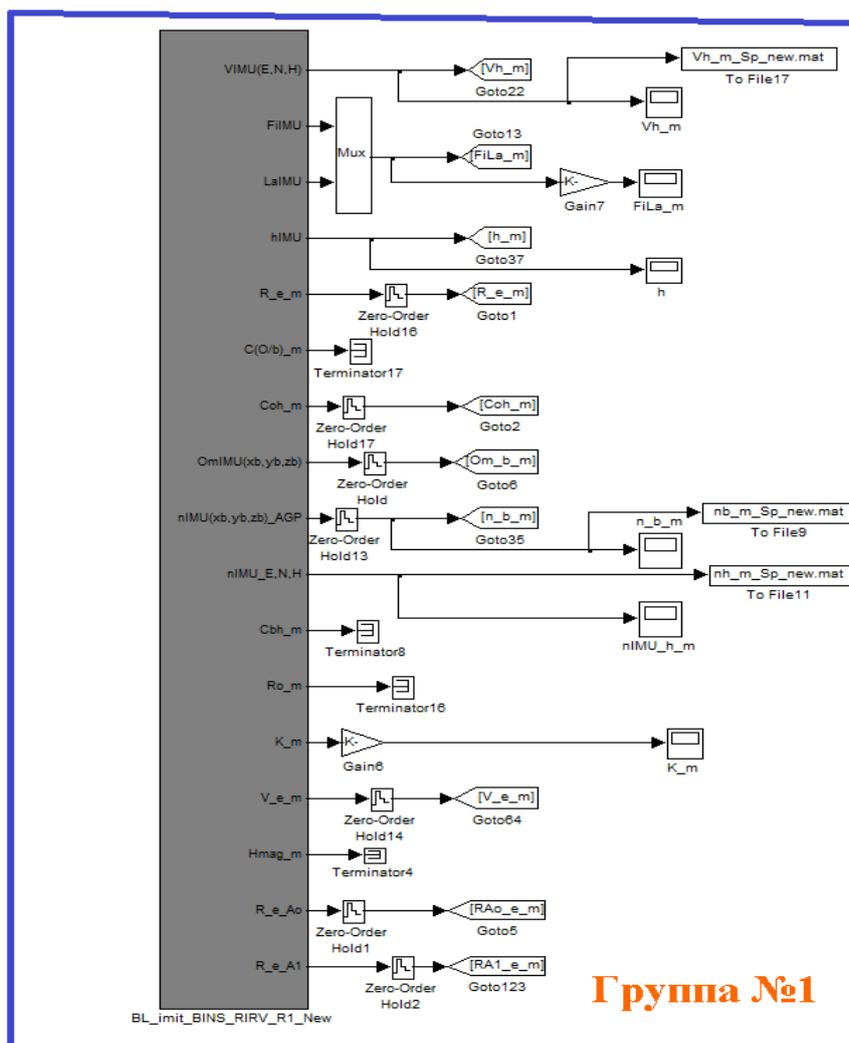
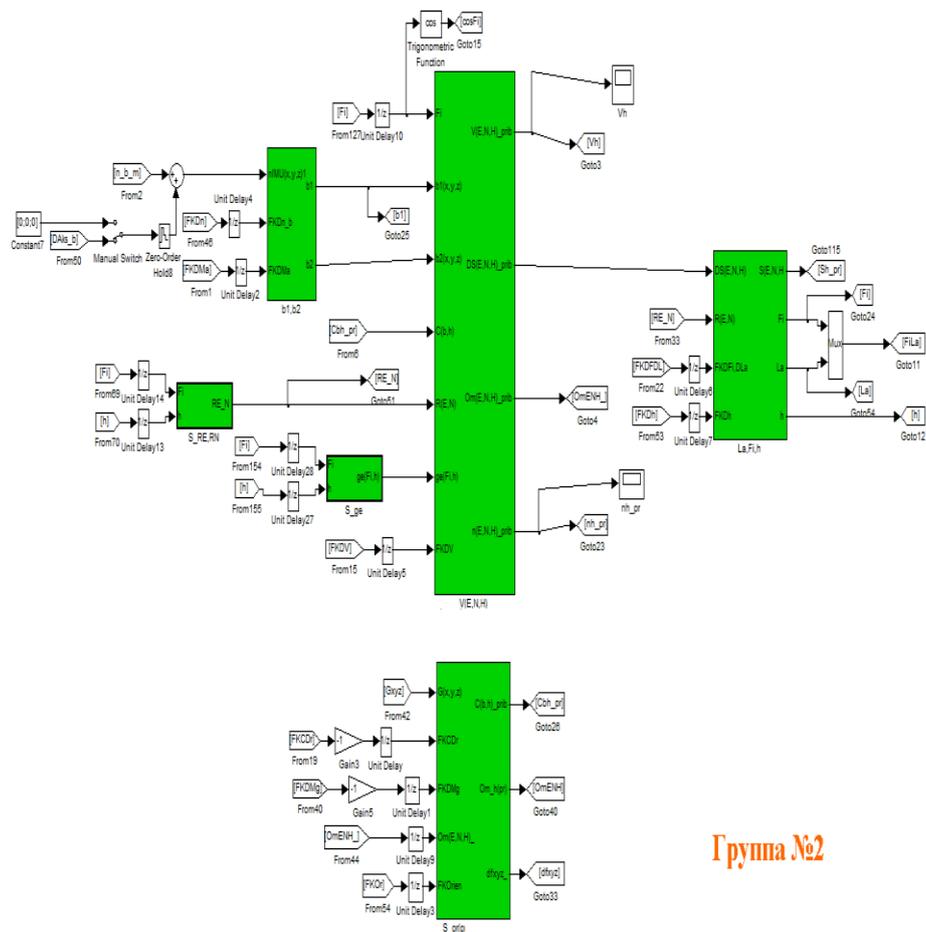


Рис. 6.1 Группа блоков №1

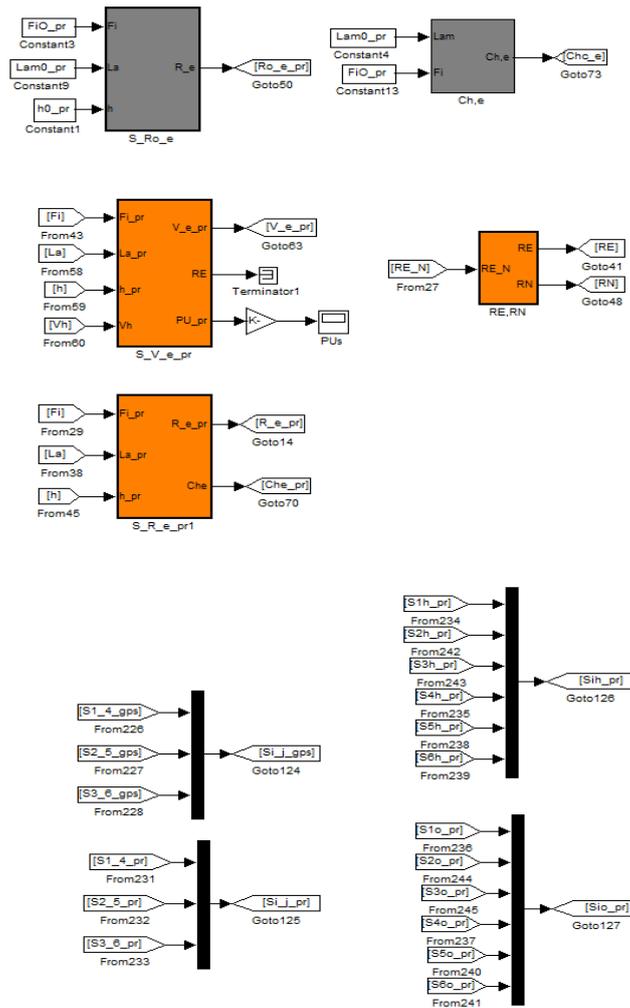
Наимен. канала	Примечание
Vh_m	Эталонные абсолютные линейные скорости в месте размещения ИИМ в осях ГСТ
FiLa_m	Эталонные сферические координаты места расположения ИИМ
h_m	Эталонное значение относительной высоты места расположения ИИМ
R_e_m	Эталонные декартовы координаты ИИМ в осях земной экваториальной системы координат
Coh_m	Эталонная матрица ориентации связанной объектом СК относительно осей ГСТ
Om_b_m	Эталонные абсолютные угловые скорости, измеряемые триадой гироскопов (восстановленные по исходным данным об углах качки и курса и их угловых скоростях, а также данным о линейных скоростях и координатах места установки ИИМ, угловой скорости вращения Земли)
n_b_m	Эталонные кажущиеся ускорения, измеряемые триадой акселерометров с учётом аномалий гравитационного поля в осях ИИМ (восстановленные по исходным данным об углах качки и курса и их угловых скоростях, а также данным о линейных скоростях и координатах места установки ИИМ)
nh_m	Эталонные кажущиеся ускорения, измеряемые триадой акселерометров с учётом аномалий гравитационного поля в осях ГСТ
K_m	Эталонное значение курса объекта
V_e_m	Эталонные абсолютные линейные скорости в месте расположения ИИМ в проекциях на оси земной экваториальной системы координат
RAo_e_m	Эталонные декартовы координаты опорной антенны двухантенной ПА СНС в осях земной экваториальной системы координат
RA1_e_m	Эталонные декартовы координаты ведомой антенны двухантенной ПА СНС в осях земной экваториальной системы координат



Группа №2

Рис. 6.2 Группа блоков №2 (блоки задач ориентации и навигации)

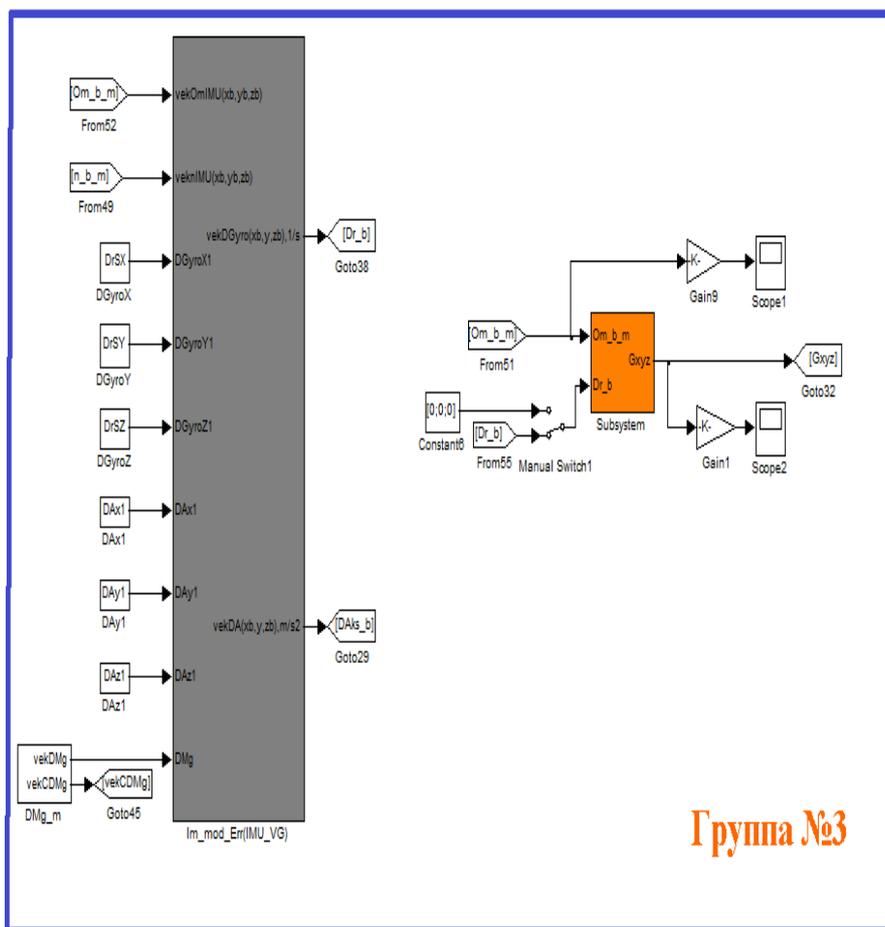
Наимен. канала	Примечание
Vh	Приборные (выработанные в ИСОН) значения абсолютной линейной скорости движения ИИМ в осях ГСТ
Sh_pr	Приборные значения относительных перемещений (относительно стартовой точки) ИИМ в осях ГСТ
Fi	Приборное значение широты места
La	Приборное значение долготы места
h	Приборное значение относительной высоты места
OmENH_	Приборное значение угловой скорости движения географического сопровождающего трёхгранника
nh_pr	Приборные значения кажущегося ускорения в проекциях на оси ГСТ
Cbh_pr	Приборное значение матрицы ориентации связанной с ИИМ СК относительно осей ГСТ
OmENH	Приборное значение угловой скорости движения географического сопровождающего трёхгранника с учётом оценок погрешностей решения задачи ориентации, полученных в результате выполнения задачи фильтрации ФК
dfxyz	Приборное значение приращения интеграла от абсолютной угловой скорости на такте решения задачи ориентации dT, вычисленное по данным гироскопов
b1	Приборное значение приращения первого интеграла кажущегося ускорения на такте решения навигационной задачи dT, вычисленное по показаниям акселерометров с учётом оценок погрешностей акселерометров, вырабатываемых в результате решения задачи фильтрации ФК ИСОН (в блоке "b1,b2" при проведении предварительного интегрирования учитываются постоянные значения смещения нуля, погрешности масштабного коэффициента, неортогональности осей акселерометров)
RE_N	Приборные значения радиусов кривизны принятого эллипсоида соответственно в плоскости первого вертикала и плоскости меридиана места



Группа №2

Рис. 6.4 Группа блоков №2

Наимен. канала	Примечание
Si_j_gps	Вектор определённых в ПА ЧС вторых разностей фазовых измерений (S1_4_gps, S2_5_gps, S3_6_gps)
Si_j_pr	Вектор рассчитанных в ИОСН вторых разностей фазовых измерений (S1_4_pr, S2_5_pr, S3_6_pr)
Sih_pr	Расчётное значение направляющего косинуса направления на i-й НС в осях ГСТ ($i=1, \dots, 6$)
Sio_pr	Расчётное значение направляющего косинуса направления на i-й НС в осях объекта ($i=1, \dots, 6$)
Ro_e_pr	Начальные декартовы координаты ИИМ в осях земной экваториальной СК
Chc_e	Начальное значение матрицы перехода от осей ГСТ к осям общеземной экваториальной СК
V_e_pr	Приборные значения проекций абсолютной линейной скорости ИИМ на оси общеземной экваториальной СК
R_e_pr	Приборные значения декартовых координат ИИМ на оси общеземной экваториальной СК
Che_pr	Приборное значение матрицы ориентации ГСТ относительно общеземной экваториальной СК
RE	Приборное значение радиуса кривизны эллипсоида в плоскости первого вертикала
RN	Приборное значение радиуса кривизны эллипсоида в плоскости меридиана места



Группа №3

Рис. 6.5 Группа блоков №3

Наимен. канала	Примечание
DrSX (DrSX, DrSZ)	Модель смещения нуля гироскопа, стоящего по оси x (y,z) ИИМ. Модель включает смещение нуля от пуска к пуску, и его изменчивость в пуске (марковский процесс первого порядка). Также учитывается шум гироскопов.
DAx1 (DAy1, DAz1)	Модель смещения нуля акселерометра, стоящего по оси x (y,z) ИИМ. Модель включает смещение нуля от пуска к пуску, и его изменчивость в пуске (марковский процесс первого порядка). Также учитывается шум акселерометров.
DMg	Модель погрешности масштабного коэффициента гироскопа. Модель учитывает погрешность масштабного коэффициента от пуска к пуску и его изменчивость в пуске (марковский процесс первого порядка).
CDMg	Модель погрешности масштабного коэффициента гироскопа, учитывающая только погрешность масштабного коэффициента от пуска к пуску.
Dr_b	Вектор, представляющий собой суммарные погрешности гироскопов (сумму смещения нуля от пуска к пуску, его нестабильность в пуске, погрешности масштабного коэффициента от пуска к пуску, его нестабильность в пуске, погрешностей из-за неортогональностей осей чувствительности гироскопов, шумовую составляющую)
DAks_b	Вектор, представляющий собой суммарные погрешности акселерометров (сумму смещения нуля от пуска к пуску, его нестабильность в пуске, погрешности масштабного коэффициента от пуска к пуску, шумовую составляющую. Погрешности из-за неортогональностей осей чувствительности акселерометров, а также дополнительная возможность задания постоянных смещений нуля и погрешности масштабного коэффициента имеется в блоке "b1,b2" группы 2)
Gxyz	Приборные значения абсолютной угловой скорости, измеряемой триадой гироскопов

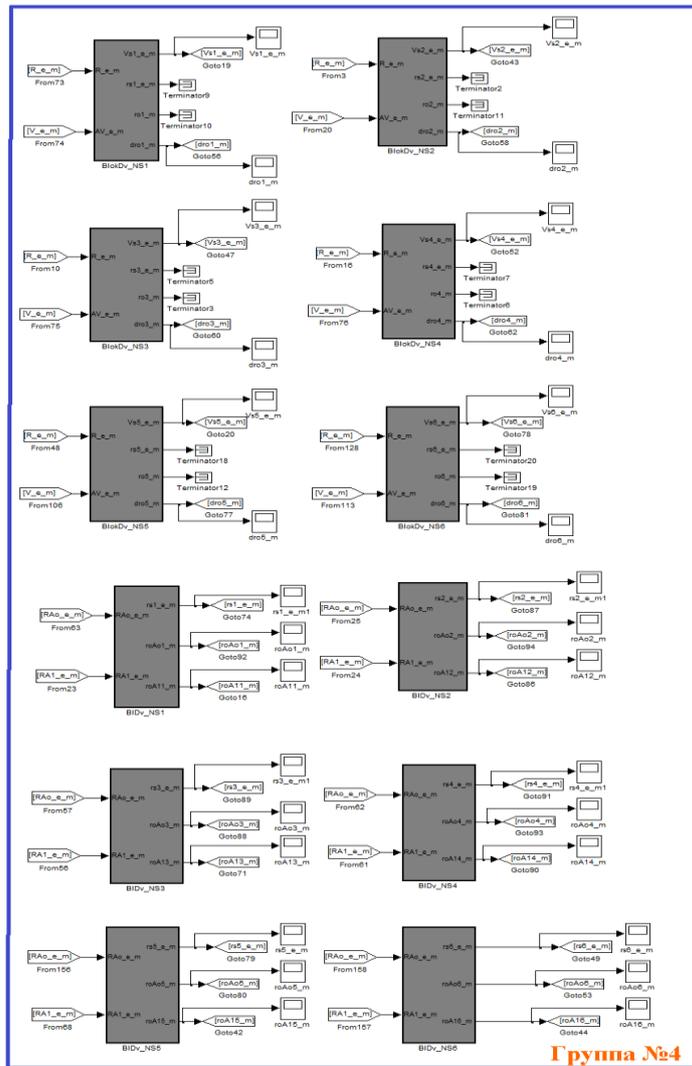


Рис. 6.6 Группа блоков №4

Наименование канала	Примечание
$Vs_{i_e_m}$ ($i=1, \dots, 6$)	Эталонные значения проекции скорости движения i -го НС на оси инерциальной СК (эфемеридная информация)
$droi_m$ ($i=1, \dots, 6$)	Эталонные значения радиальной скорости движения i -го НС относительно ИИМ
rsi_e_m ($i=1, \dots, 6$)	Эталонные значения проекции радиуса-вектора i -го НС на оси инерциальной СК
$roAoi_m$ ($i=1, \dots, 6$)	Эталонные значения проекции радиуса-вектора опорной антенны двухантенной ПА СНС на оси инерциальной СК
$roAli_m$ ($i=1, \dots, 6$)	Эталонные значения проекции радиуса-вектора ведомой антенны двухантенной ПА СНС на оси инерциальной СК

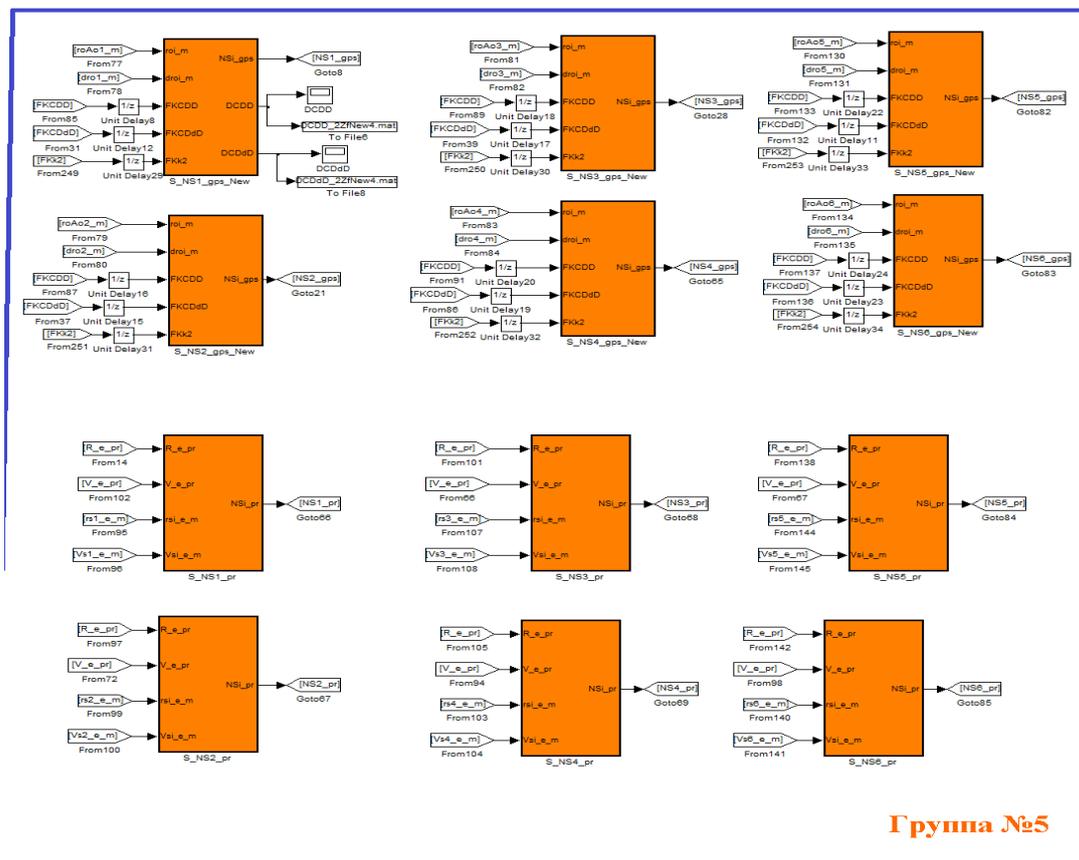


Рис. 6.7 Группа блоков №5

Наименование канала	Примечание
NSi_gps (i=1,...,6)	Вектор, включающий измеренные ПА СНС псевдодальность и псевдоскорость (ro _i _gps, dro _i _gps) с учётом оценок погрешностей ПА СНС, поступающих из задачи фильтрации ИСОН
DCDD	Разность между погрешностью ПА СНС в выработке радиальной дальности, обусловленной нестабильностью часов ПА СНС, и её оценкой, вырабатываемой в задаче фильтрации ИСОН
DCDdD	Разность между погрешностью ПА СНС в выработке радиальной скорости, обусловленной нестабильностью частоты ПА СНС, и её оценкой, вырабатываемой в задаче фильтрации ИСОН
NSi_pr (i=1,...,6)	Вектор, включающий расчётные значения радиальной дальности и радиальной скорости (ro _i _pr, dro _i _pr), выработанные в ИСОН

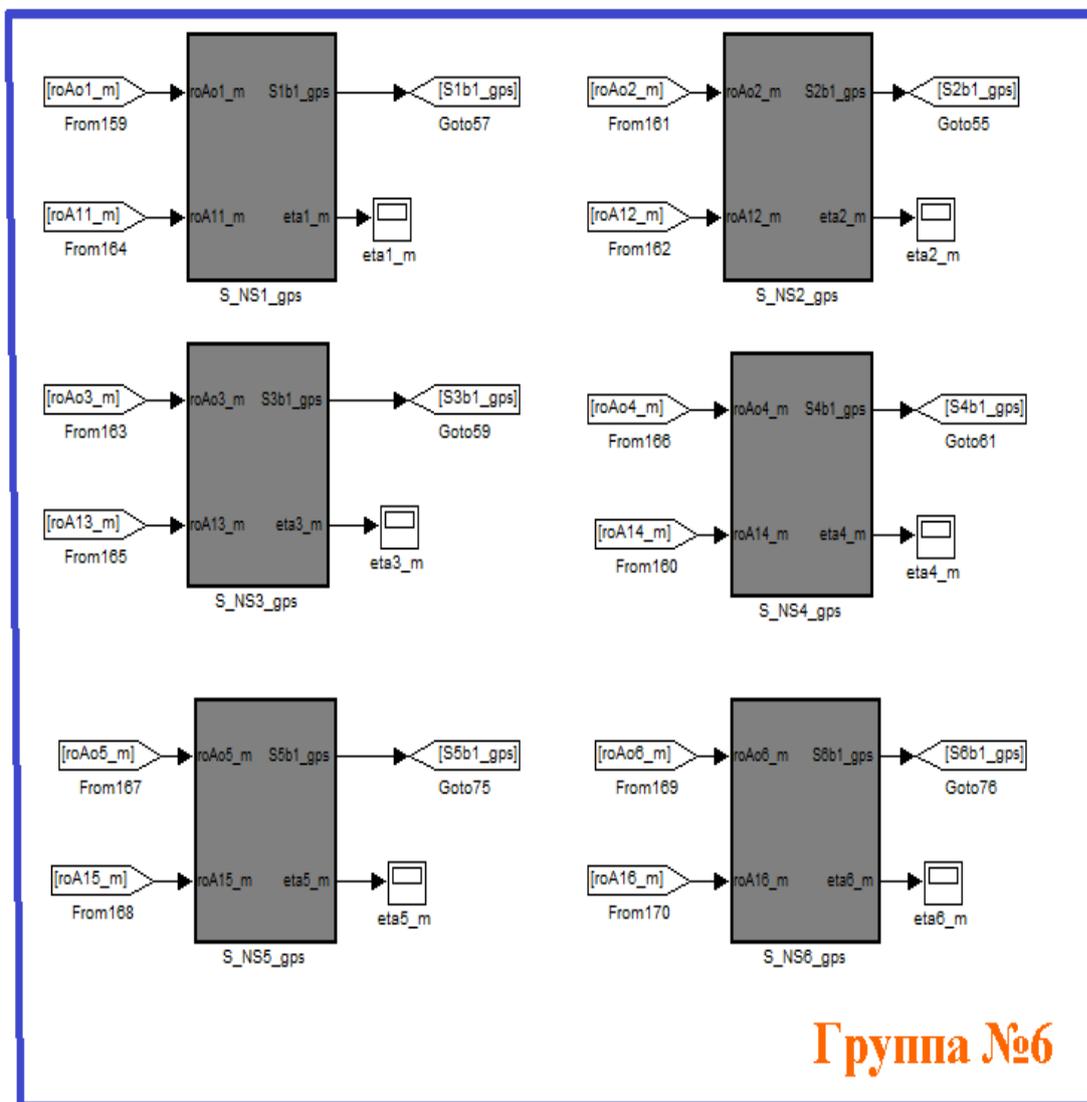
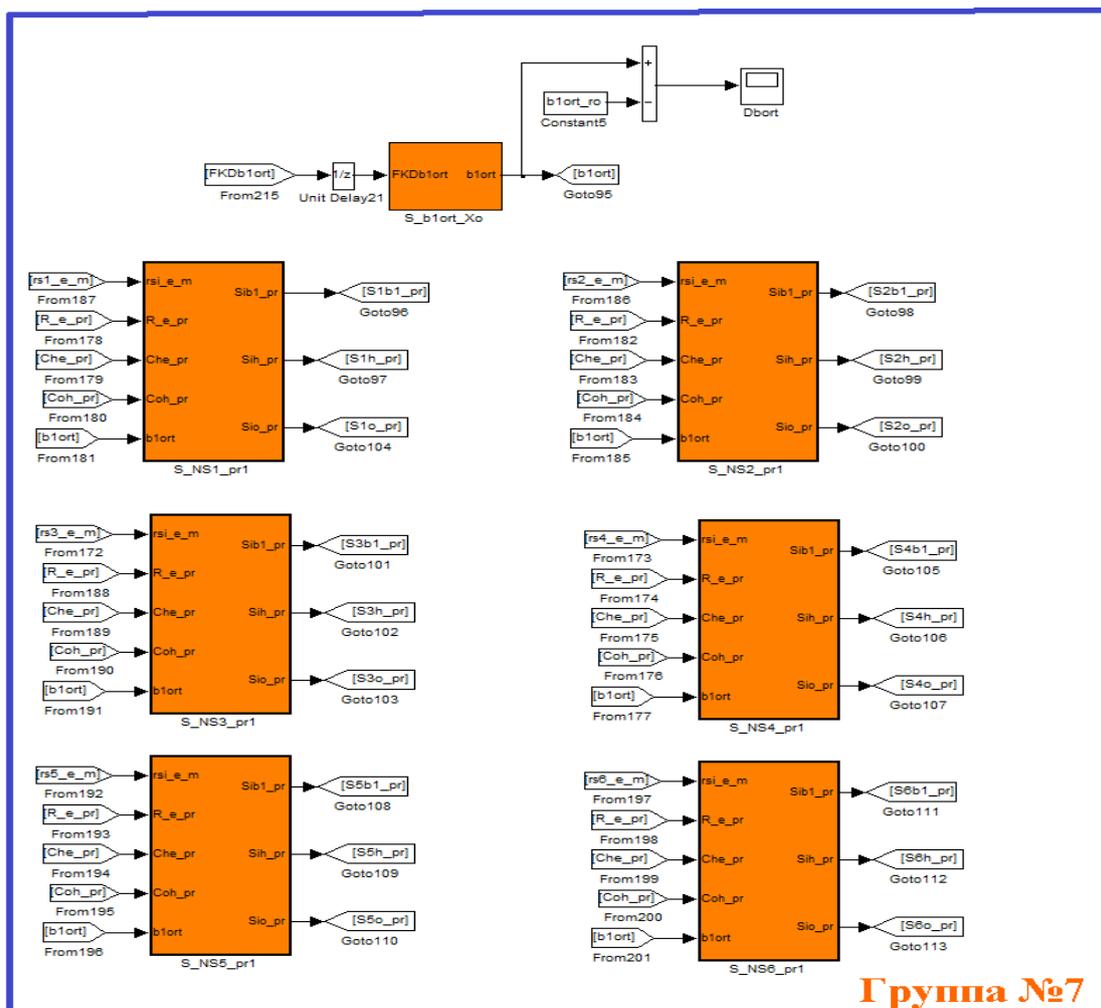


Рис. 6.8 Группа блоков №6

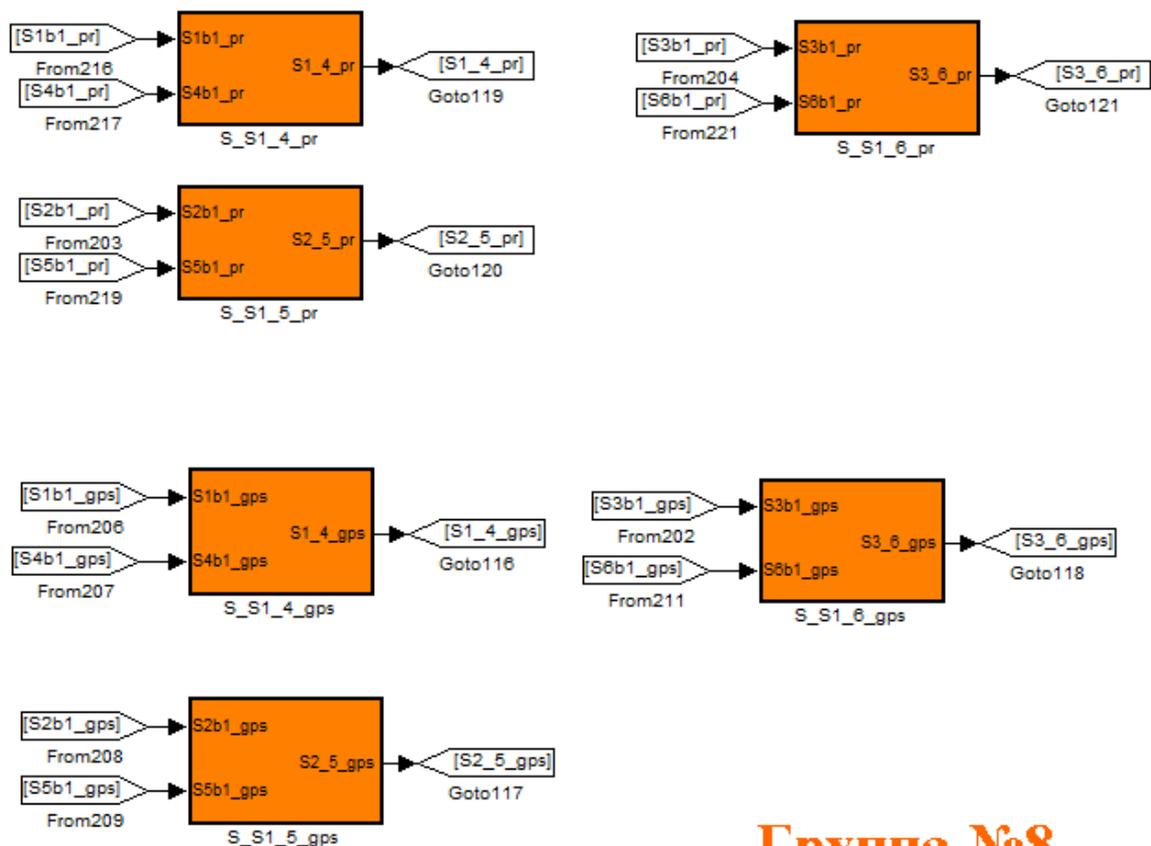
Наименование канала	Примечание
Sib1_gps (i=1,...,6)	Определённая в ПА СНС первая разность фаз i-го НС с учётом неоднозначности и шумов фазовых измерений
etai_m (i=1,...,6)	Целое число длин волн эталонной первой разности фазовых измерений



Группа №7

Рис. 6.9 Группа блоков №7

Наименование канала	Примечание
b1ort_ro	Эталонное значение вектора антенной базы в проекциях на оси связанной с объектом системы координат (ССК)
b1ort	Приборное значение вектора антенной базы с учётом оценок погрешностей ориентации базы в осях ССК
Sib1_pr (i=1,...,6)	Расчётное (приборное) значение первой разности фаз, полученное в ИСОН
Sih_pr (i=1,...,6)	Расчётное значение направляющего косинуса направления на i-й НС в осях ГСТ (i=1,...,6)
Sio_pr (i=1,...,6)	Расчётное значение направляющего косинуса направления на i-й НС в осях объекта (i=1,...,6)



Группа №8

Рис. 6.10 Группа блоков №8

Наименование канала	Примечание
S1_4_gps, S3_6_gps, S2_5_gps	Определённые по данным ПА СНС вторые разности фазовых измерений
S1_4_pr, S3_6_pr, S2_5_pr	Рассчитанные в ИСОН вторые разности фазовых измерений

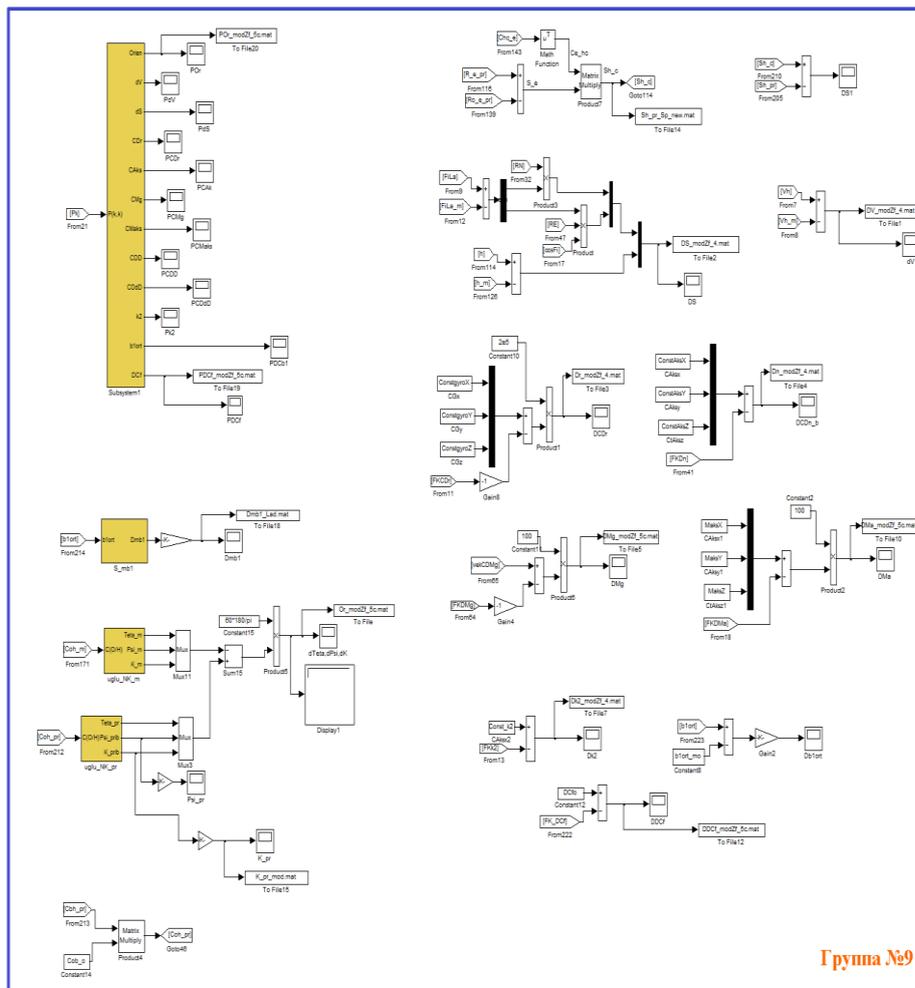


Рис. 6.11 Группа блоков №9

Наименование канала	Примечание
POg	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей решения задачи ориентации ИСОН (α, β, γ)
PdV	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей решения навигационной задачи ИСОН ($\Delta VE, \Delta VN, \Delta VH$)
PdS	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей решения навигационной задачи ИСОН ($\Delta Fi, \Delta La, h$)
PCDr	Вектор СКО погрешностей оценок смещений нулей триады гироскопов ($\Delta Gxb, \Delta Gyb, \Delta Gzb$)
PCAk	Вектор СКО погрешностей оценок смещений нулей триады акселерометров ($\Delta Axb, \Delta Ayb, \Delta Azb$)
PCMg	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей масштабных коэффициентов триады гироскопов ($\Delta Mgxb, \Delta Mgyb, \Delta Mgzb$)
PCMaks	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей масштабных коэффициентов триады акселерометров ($\Delta Agxb, \Delta Agyb, \Delta Agzb$)
PCDD	Вектор СКО погрешностей псевдодальностей до наблюдаемых НС _i , обусловленная уходом часов ПА СНС
PCDDd	Вектор СКО погрешностей псевдоскоростей до наблюдаемых НС _i , обусловленная уходом частоты ПА СНС
Pk2	СКО погрешности скорости ухода частоты ПА СНС
PDCb1	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей привязки антенной базы двухантенной ПА СНС к осям объекта ($\Delta b1y, \Delta b1z$)
PDCf	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей фазовых измерений ПА СНС ($\Delta Cf4_1, \Delta Cf5_2, \Delta Cf6_3$)

Смысл и содержание остальных блоков группы понятен исходя из поступающих на их входы данных, являющихся выходами ранее описанных групп и блоков.

Далее рассмотрим более подробно содержание наиболее сложной подсистемы, описывающей алгоритмы задачи совместной обработки данных ИИМ и ПА СНС (задачи калмановской фильтрации) и относящейся к группе №2.

Внешний вид внутреннего содержания данной подсистемы приведён на рис.7.

Как и ранее, блоки подсистемы объединены по функциональному признаку, что обозначено цветом.

Группа №2.1 – подсистема, формирующая разностные измерения задачи совместной обработки данных ИИМ и ПА СНС (задачи фильтрации ОФК) и объединяющая их в единый вектор измерений (Z). Здесь происходит формирование разностных измерений по радиальным дальностям и скоростям (Z_NSi , $i=1, \dots, 6$) до наблюдаемых i -х НС, а также вторых разностей фазовых измерений (Z_S1_4f , Z_S2_5f , Z_S3_6f). Недостоверные измерения исключаются из рассмотрения занулением либо автоматически (по значениям флагов flg_snsi , $i=1, \dots, 6$, являющихся элементами вектора $flag_sns$), либо в ручном режиме при переключении соответствующих ключей .

Кроме того, на выход подсистемы поступают расчётные (приборные) значения радиальных дальностей (roi_pr , $i=1, \dots, 6$) и радиальных скоростей ($droi_pr$, $i=1, \dots, 6$), вектор флагов достоверности данных ($flag_sns$).

Группа №2.2 – подсистемы данной группы реализуют алгоритмы формирования матриц измерений 15×29 (dNi , $i=1, \dots, 6$) по радиальным дальностям и скоростям (вместо размерности 2×29 матрица имеет размерность 15×29 . Это сделано для возможности последующего суммирования всех i -х матриц измерений и получения итоговой матрицы измерений ФК, при этом строки матрицы, не имеющие отношения к i -му измерению зануляются). При формировании матриц учитывается недостоверность измерений, формируемая по результатам анализа исходных данных ПА СНС (flg_snsi) и по результатам анализа невязок разностных измерений (flg_dNi , блоки групп 2.4 и 2.5).

Группа №2.3 – подсистемы данной группы реализуют алгоритмы формирования матриц измерений 15×29 ($dHS1_4$, $dHS2_5$, $dHS3_6$) по вторым разностям фазовых измерений. При формировании матриц учитывается недостоверность измерений, формируемая по результатам анализа невязок разностных измерений (flg_dHS1_4 , flg_dHS2_5 , flg_dHS3_6 , блоки групп 2.4 и 2.5).

Группа №2.4 – данная подсистема реализует алгоритм сравнения невязок (Z) разностных измерений с расчётными СКО погрешностей измерений, умноженными на множитель kz , позволяющий достичь заданного уровня доверительной вероятности для диапазона возможных значений погрешности измерений $\pm kz * SKO_Zi$ ($i=1, \dots, 15$).

Группа №2.5 – подсистемы, вырабатывающие флаги недостоверности измерений после сравнения невязок с расчётным уровнем погрешностей измере-

ний, а также вектор измерений ФК после зануления недостоверных измерений, идущий в задачу оценивания вектора состояния системы.

Группа №2.6 – формирование матрицы измерений ОФК с учётом частоты их поступления в задачу фильтрации ($1/Tz$).

Группа №2.7 – формирование матрицы динамики системы (F) и переходной матрицы на частоте решения ковариационного канала ($Fkper_dT$) и частоте работы оценочного канала ФК ($Fkper_Tz$).

Группа №2.8 – подсистема, содержащая алгоритмы работы ковариационного канала ФК, на выход которой поступают матричный коэффициент усиления ФК ($K(k+1)$) на шаге Tz ($k+1$), ковариационная матрица ошибок оценок ФК ($Pk+1$), расчётное значение СКО погрешностей измерений ФК ($Sigma_Z$).

Группа №2.9 – подсистема, реализующая алгоритмы оценочного канала ФК.

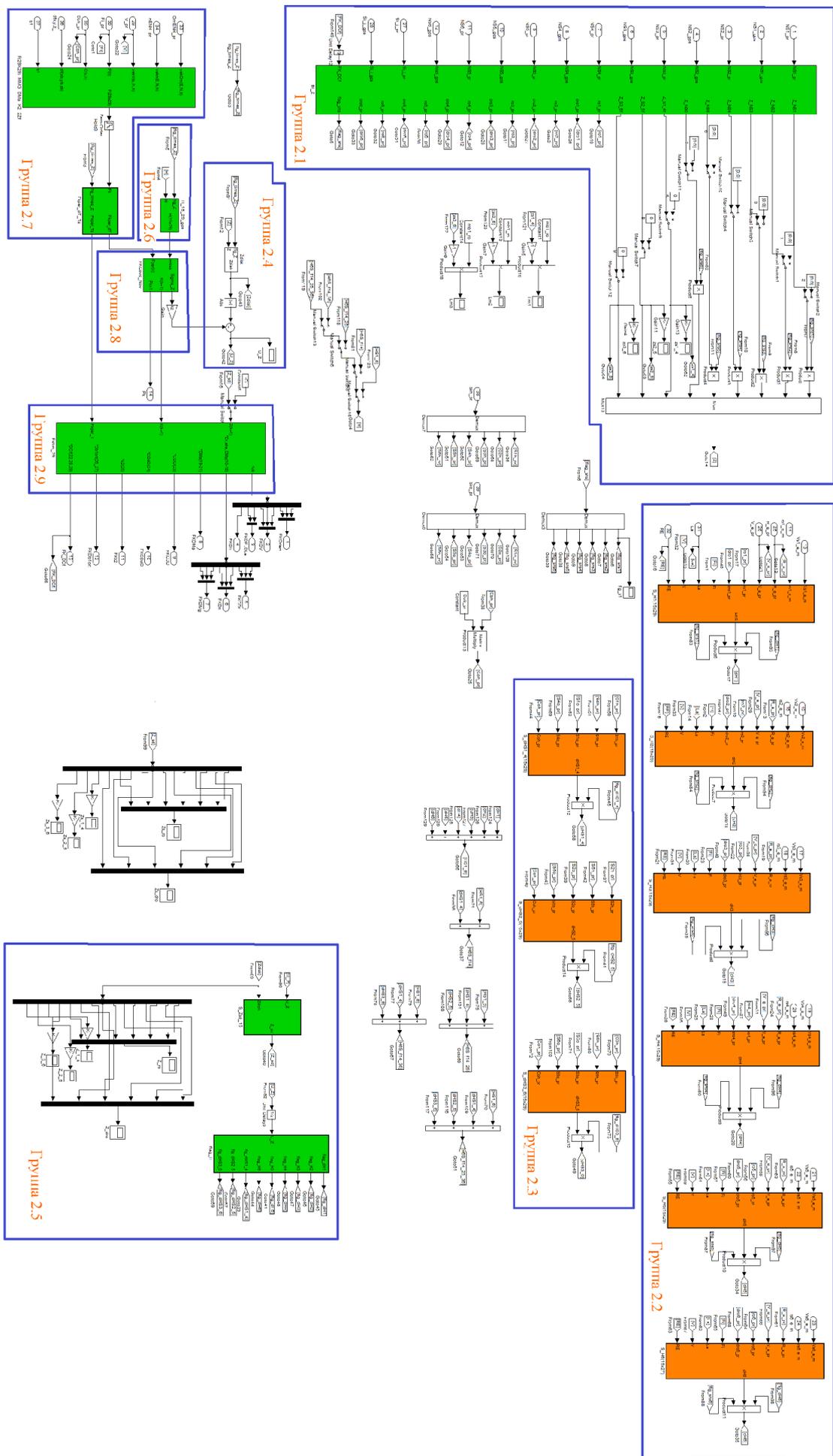


Рис. 7 Блоки задачи калмановской фильтрации ИСОН

Описание имитационной модели ISON_real_dRoRo_P2

Данная имитационная модель содержит три типа файлов:

- загрузочные *.m-файлы;
- собственно файл имитационной модели *.mdl;
- *.m-файлы просмотра результатов моделирования.

Описание структуры и содержания необходимых *.m-файлов с достаточной степенью детализации приведены в соответствующих комментариях в самих файлах. Здесь ограничимся лишь перечислением их состава.

Рассматриваемая имитационная модель содержит два загрузочных script-файла, запускаемых друг за другом в следующем порядке:

1. *loader_Prsm_raw27id1_EmMMG_4m.m*;
2. *SS_IS25re_MMGdat_6NS_131_27id1_avt_prN1.m*,

а также соответствующие файлы просмотра результатов моделирования (их назначение и выводимые ими результаты следуют из их названия и тех *.mat-файлов, к которым они обращаются).

При повторении моделирования необходимо заново выполнить загрузочные script-файлы, что позволит правильно инициализировать содержащиеся в них глобальные переменные (помеченные оператором *global*).

Далее рассмотрим описание имитационной модели *SS_IS25Are_VGMG_6NS_131K_avt_prN1.mdl*.

Функциональные блоки имитационной модели условно разбиты на соответствующие группы (от 1 до 9, рис.П2.1). С целью обеспечения единства излагаемого в приложениях материала в данном приложении сохранён тот же принцип в обозначениях, что и в Приложении П1: основные блоки маркированы цветом и объединены в соответствующие группы:

- тёмно-серым обозначены блоки, задающие как движение объекта и эталонные показания инерциальных ЧЭ, так и параметры движения навигационных спутников (их эфемериды), параметры движения антенн ПА СНС, первые разности фазовых измерений двухантенной ПА СНС;

- зелёным обозначены блоки, выполняющие основные функциональные задачи ИСОН (задачу ориентации и навигации, задачу калмановской фильтрации совместной обработки данных ИИМ и ПА СНС);

- оранжевым обозначены блоки вторичной обработки данных, вырабатываемых блоками других групп;

- жёлтым обозначены блоки, предназначенные для отображения результатов моделирования и обработки результатов моделирования с целью более удобного их представления для последующего анализа результатов.

Группы функциональных блоков имеют следующее назначение.

К группе №1, №3 относится только один блок, содержащий блоки чтения массивов реальных данных ЧЭ ИИМ, массивов реальных данных об эталонных кинематических параметрах движения объекта.

К группе №2 относятся блоки основных функциональных задач ИСОН (задачи ориентации и навигации, задачи совместной обработки данных ИИМ и ПА СНС).

К группе №4 принадлежат блоки чтения массивов реальных данных ПА СНС по радиальным скоростям и радиальным дальностям относительного движения шести НС и места размещения ИИМ, а также чтения массивов эфемерид шести наблюдаемых НС.

К группе №5 относятся блоки формирования измеренных значений псевдодальностей и радиальных скоростей движения НС и их расчётных значений.

К группе №9 относятся блоки индикации результатов моделирования.

Отсутствие в описании некоторых групп (№6, №7, №8) обусловлено отсутствием соответствующих функциональных задач в модели по сравнению с наиболее полной в этом отношении моделью *SS_IS29mod3_MMG_6NS_2ZfNew30.mdl* (Приложение П1).

Далее приводится описание входных и выходных переменных блоков каждой из групп.

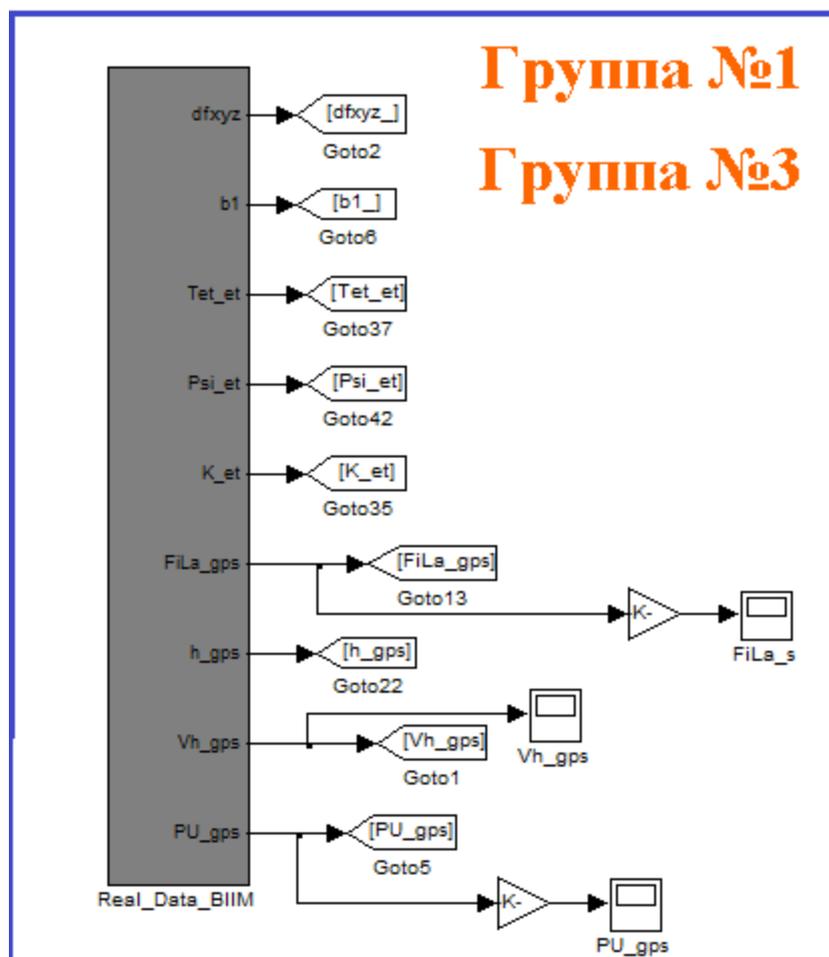


Рис. П2.2 Группы блоков №1, №3

Наименование канала	Примечание
dfxyz	Вектор приращений на такте dT первых интегралов показаний гироскопов ИИМ
b1	Вектор приращений на такте dT первых интегралов показаний акселерометров ИИМ
Tet_et, Psi_et, K_et	Эталонные значения углов бортовой и килевой качки, и курса соответственно
FiLa_gps	Эталонные сферические координаты места расположения ИИМ
h_gps	Эталонное значение относительной высоты места расположения ИИМ
Vh_gps	Эталонные абсолютные линейные скорости в месте размещения ИИМ в осях ГСТ
PU_gps	Эталонное значение путевого угла

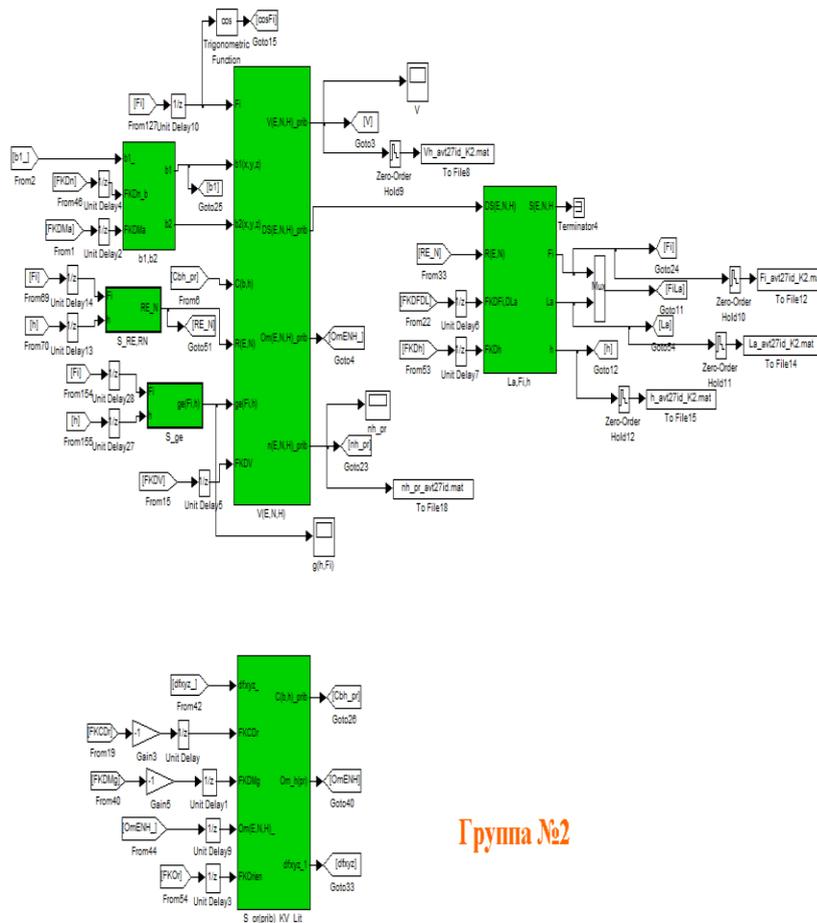
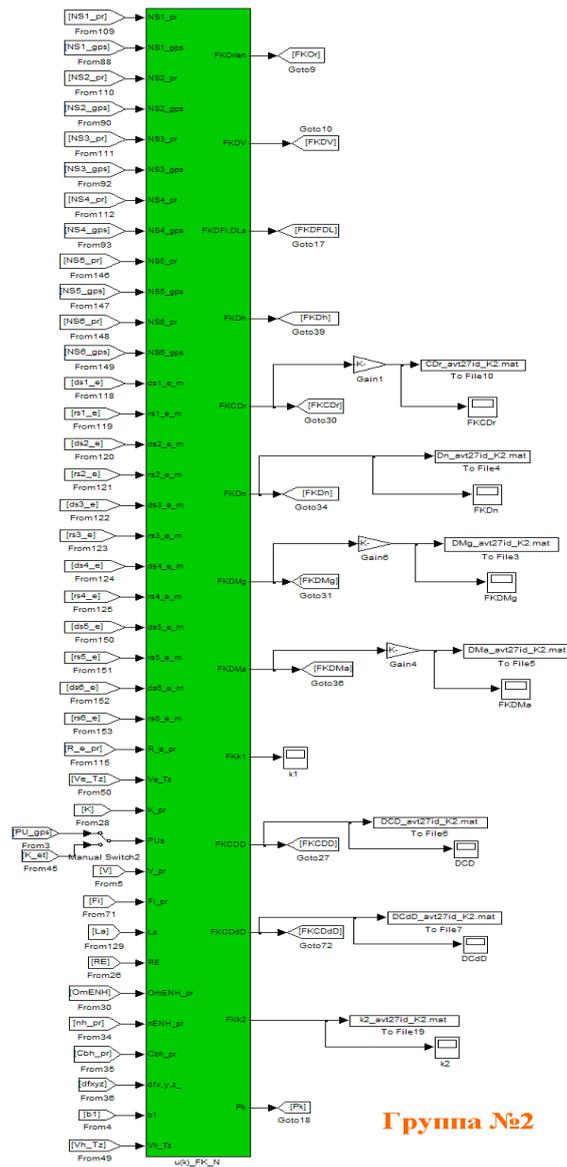


Рис. П2.3 Группа блоков №2

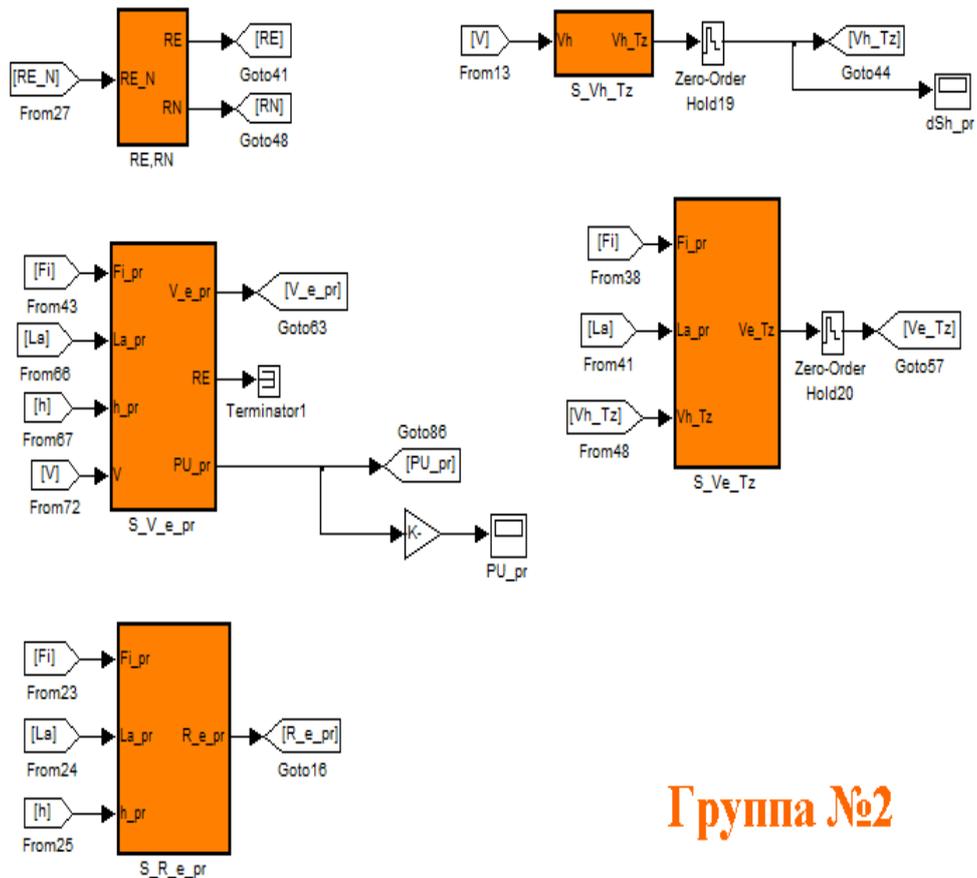
Наимен. канала	Примечание
V	Приборные (выработанные в ИСОН) значения абсолютной линейной скорости движения ИИМ в осях ГСТ
Sh_pr	Приборные значения относительных перемещений (относительно стартовой точки) ИИМ в осях ГСТ
Fi	Приборное значение широты места
La	Приборное значение долготы места
h	Приборное значение относительной высоты места
OmENH_	Приборное значение угловой скорости движения географического сопровождающего трёхгранника
nh_pr	Приборные значения кажущегося ускорения в проекциях на оси ГСТ
Cbh_pr	Приборное значение матрицы ориентации связанной с ИИМ СК относительно осей ГСТ
OmENH	Приборное значение угловой скорости движения географического сопровождающего трёхгранника с учётом оценок погрешностей решения задачи ориентации, полученных в результате выполнения задачи фильтрации ФК
dfxyz	Приборное значение приращения интеграла от абсолютной угловой скорости на такте решения задачи ориентации dT, вычисленное по данным гироскопов с учётом оценок погрешностей гироскопов, вырабатываемых в результате решения задачи фильтрации ФК ИСОН (в блоке "S_or(pr)_KV_Lit" при проведении предварительного интегрирования учитываются постоянные значения смещения нуля, погрешности масштабного коэффициента, неортогональности осей гироскопов)
b1	Приборное значение приращения первого интеграла кажущегося ускорения на такте решения навигационной задачи dT, вычисленное по показаниям акселерометров с учётом оценок погрешностей акселерометров, вырабатываемых в результате решения задачи фильтрации ФК ИСОН (в блоке "b1,b2" при проведении предварительного интегрирования учитываются постоянные значения смещения нуля, погрешности масштабного коэффициента, неортогональности осей акселерометров)
RE_N	Приборные значения радиусов кривизны принятого эллипсоида соответственно в плоскости первого вертикала и плоскости меридиана места



Группа №2

Рис. П2.4 Группа блоков №2

Наимен. канала	Примечание
FKOrien	Вектор оценок погрешностей решения задачи ориентации ИСОН (α, β, γ)
FKDV	Вектор оценок погрешностей решения навигационной задачи ИСОН ($\Delta VE, \Delta VN, \Delta VH$)
FKDFi,DLa	Вектор оценок погрешностей решения навигационной задачи ИСОН ($\Delta Fi, \Delta La$)
FKDh	Оценка погрешности решения навигационной задачи ИСОН в части выработки относительной высоты места ИИМ (ΔH)
FKCDr	Вектор оценок смещений нулей триады гироскопов ($\Delta Gxb, \Delta Gyb, \Delta Gzb$)
FKDn	Вектор оценок смещений нулей триады акселерометров ($\Delta Axb, \Delta Ayb, \Delta Azb$)
FKDMg	Вектор оценок погрешностей масштабных коэффициентов триады гироскопов ($\Delta Mgxb, \Delta Mgyb, \Delta Mgz$)
FKDMa	Вектор оценок погрешностей масштабных коэффициентов триады акселерометров ($\Delta Agxb, \Delta Agyb, \Delta Agz$)
FKk1	Резервный параметр
FKCDD	Оценка погрешности псевдодальностей до наблюдаемых НС _i , обусловленная уходом часов ПА СНС
FKCDDd	Оценка погрешности псевдоскоростей до наблюдаемых НС _i , обусловленная уходом частоты ПА СНС
FKk2	Оценка погрешности скорости ухода частоты ПА СНС
Pk	Ковариационная матрица 29x29 задачи фильтрации ФК ИСОН



Группа №2

Рис. П2.5 Группа блоков №2

Наименование канала	Примечание
RE	Приборное значение радиуса кривизны эллипсоида в плоскости первого вертикала
RN	Приборное значение радиуса кривизны эллипсоида в плоскости меридиана места
V_e_pr	Приборные значения проекций абсолютной линейной скорости ИИМ на оси обще-земной экваториальной СК
PU_pr	Приборное значение путевого угла
R_e_pr	Приборные значения декартовых координат ИИМ на оси общеземной экваториальной СК
Vh_Tz	Вектор средних значений на шаге Tz проекций скорости объекта на оси ГСТ
Ve_Tz	Вектор средних значений на шаге Tz проекций скорости объекта на оси связанной с Землей системы координат

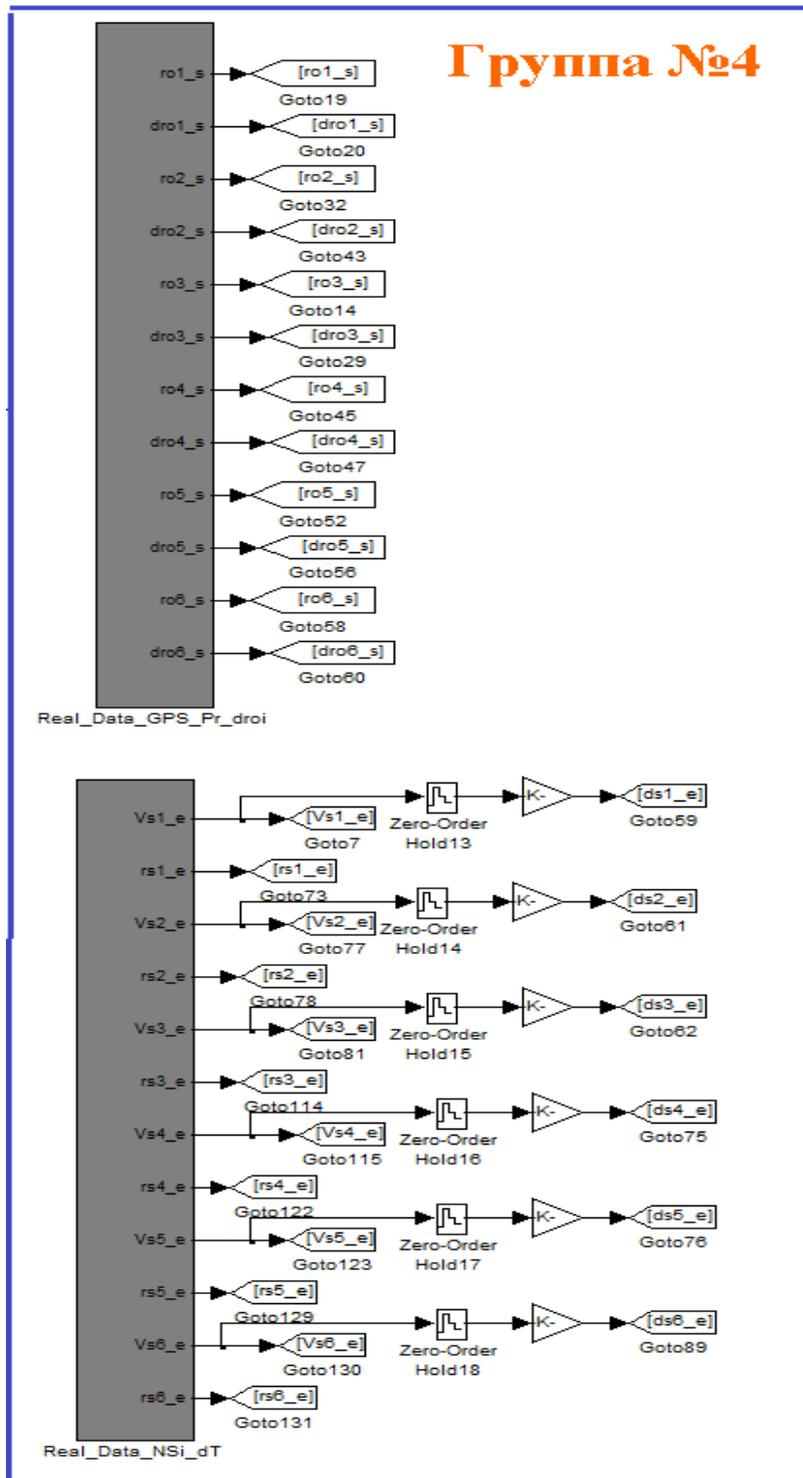


Рис. П2.6 Группа блоков №4

Наименование канала	Примечание
Vs_i_e ($i=1, \dots, 6$)	Эталонные значения проекции скорости движения i -го НС на оси инерциальной СК (эффемеридная информация)
$droi_s$ ($i=1, \dots, 6$)	Эталонные значения радиальной скорости движения i -го НС относительно ИИМ
rs_i_e ($i=1, \dots, 6$)	Эталонные значения проекции радиуса-вектора i -го НС на оси инерциальной СК (эффемеридная информация)
roi_s ($i=1, \dots, 6$)	Эталонные значения радиальной дальности движения i -го НС относительно ИИМ

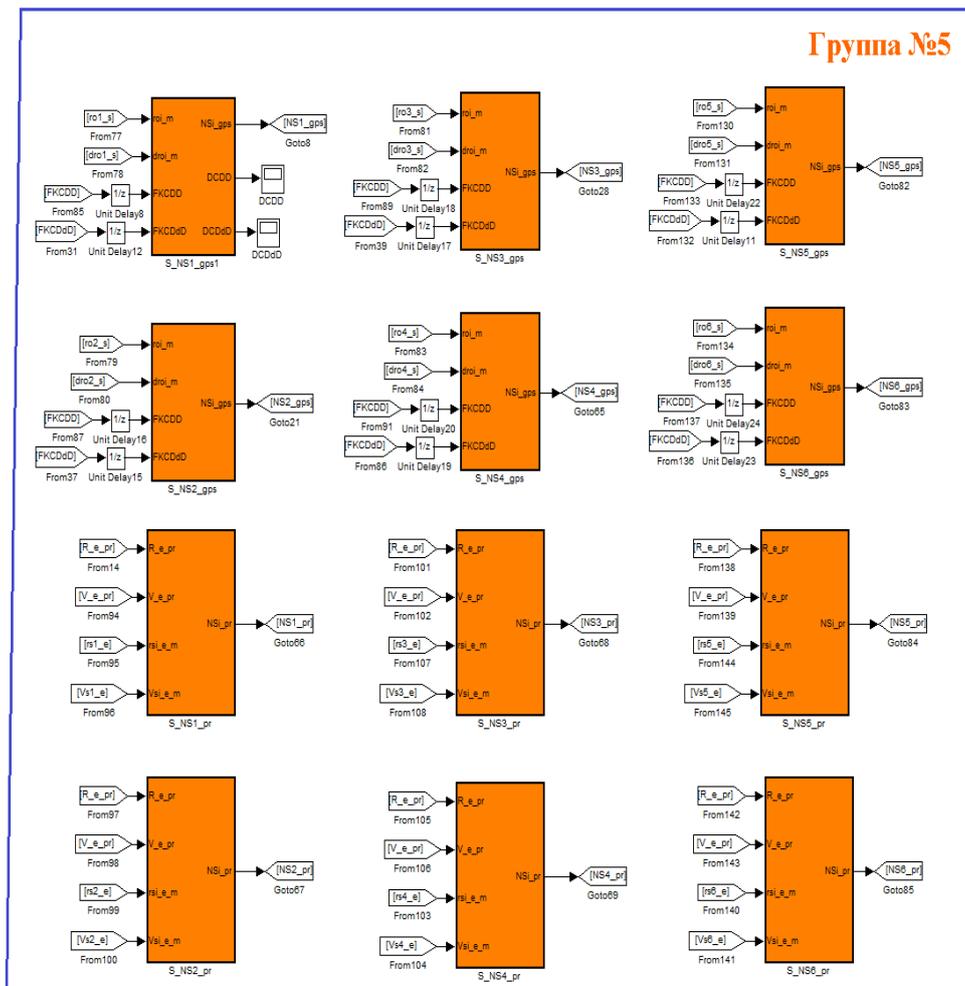


Рис. П2.7 Группа блоков №5

Наименование канала	Примечание
NSi_gps (i=1,...,6)	Вектор, включающий измеренные ПА СНС псевдодальность и псевдоскорость (roi_s, droi_s) с учётом оценок погрешностей ПА СНС, поступающих из задачи фильтрации ИСОН
DCDD	Разность между погрешностью ПА СНС в выработке радиальной дальности, обусловленной нестабильностью часов ПА СНС, и её оценкой, вырабатываемой в задаче фильтрации ИСОН
DCDdD	Разность между погрешностью ПА СНС в выработке радиальной скорости, обусловленной нестабильностью частоты ПА СНС, и её оценкой, вырабатываемой в задаче фильтрации ИСОН
NSi_pr (i=1,...,6)	Вектор, включающий расчётные значения радиальной дальности и радиальной скорости (roi_pr, droi_pr), выработанные в ИСОН

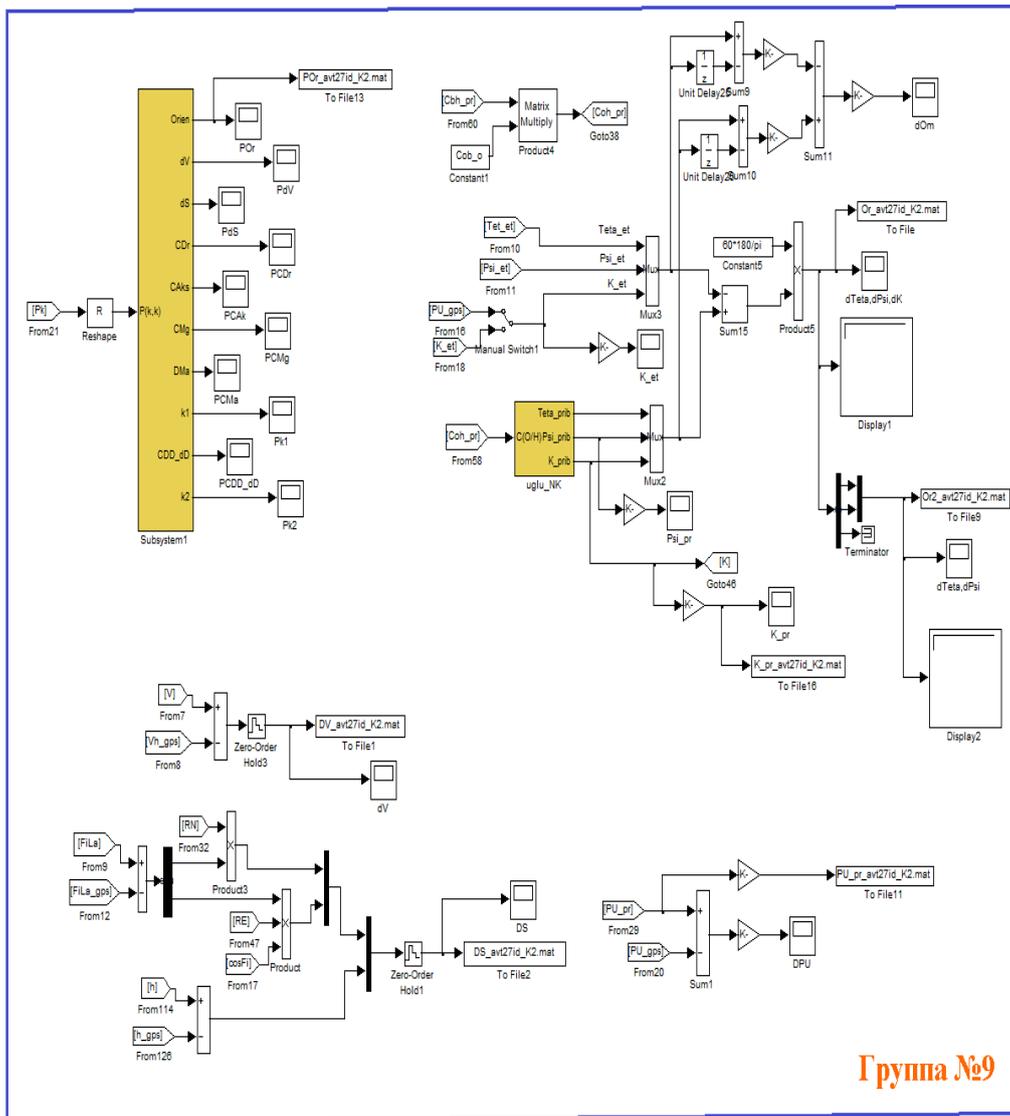


Рис. П2.8 Группа блоков №9

Наименование канала	Примечание
POr	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей решения задачи ориентации ИСОН (α, β, γ)
PdV	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей решения навигационной задачи ИСОН ($\Delta VE, \Delta VN, \Delta VH$)
PdS	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей решения навигационной задачи ИСОН ($\Delta Fi, \Delta La, h$)
PCDr	Вектор СКО погрешностей оценок смещений нулей триады гироскопов ($\Delta Gxb, \Delta Gyb, \Delta Gzb$)
PCAk	Вектор СКО погрешностей оценок смещений нулей триады акселерометров ($\Delta Axb, \Delta Ayb, \Delta Azb$)
PCMg	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей масштабных коэффициентов триады гироскопов ($\Delta Mgxb, \Delta Mgyb, \Delta Mgz$)
PCMaks	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей масштабных коэффициентов триады акселерометров ($\Delta Agxb, \Delta Agyb, \Delta Agz$)
Pk1	Резервный параметр
PCDD_dD (PCDD, PCDDd)	Вектор СКО погрешностей псевдодальностей до наблюдаемых НС _i , обусловленных уходом часов ПА СНС, и СКО погрешностей псевдоскоростей до наблюдаемых НС _i , обусловленных уходом частоты ПА СНС
PK2	СКО погрешности скорости ухода частоты ПА СНС

Рассмотрим более подробно содержание наиболее сложной подсистемы, описывающей алгоритмы задачи совместной обработки данных ИИМ и ПА СНС (задачи калмановской фильтрации) и относящейся к группе №2.

Внешний вид внутреннего содержания данной подсистемы приведён на рис.П2.9.

Как и ранее блоки подсистемы объединены по функциональному признаку, что обозначено цветом. Нумерация и обозначения блоков сохранены такими же, как и у модели Приложения П1 (поэтому при обозначении групп блоков пропущены отсутствующие в данной модели группы).

Группа №2.1 – подсистема, формирующая разностные измерения задачи совместной обработки данных ИИМ и ПА СНС (задачи фильтрации ОФК) и объединяющая их в единый вектор измерений (Z). Здесь происходит формирование разностных измерений по радиальным дальностям и скоростям (Z_NSi , $i=1, \dots, 6$) до наблюдаемых i -ых НС, а также курсового измерения (Z_K). Недостоверные измерения исключаются из рассмотрения занулением либо автоматически (по значениям флагов flg_snsi , $i=1, \dots, 6$, являющихся элементами вектора $flag_sns$), либо в ручном режиме при переключении соответствующих ключей

Кроме того, на выход подсистемы поступают расчётные (приборные) значения радиальных дальностей (roi_pr , $i=1, \dots, 6$) и радиальных скоростей ($droi_pr$, $i=1, \dots, 6$), вектор флагов достоверности данных ($flag_sns$).

Группа №2.2 – подсистемы данной группы реализуют алгоритмы формирования матриц измерений 13×25 (dNi , $i=1, \dots, 6$) по радиальным дальностям и скоростям (вместо размерности 2×25 матрица имеет размер 13×25 . Это сделано для возможности последующего суммирования всех i -ых матриц измерений и получения итоговой матрицы измерений ФК, при этом строки матрицы, не имеющие отношения к i -му измерению зануляются). При формировании матриц учитывается недостоверность измерений, формируемая по результатам анализа исходных данных ПА СНС (flg_snsi) и по результатам анализа невязок разностных измерений (flg_Ni , блоки групп 2.4 и 2.5).

Группа №2.4 – данная подсистема реализует алгоритм сравнения невязок (Z) разностных измерений с расчётными СКО погрешностей измерений, умноженными на множитель “6”, позволяющий достичь заданного уровня доверительной вероятности для диапазона возможных значений погрешности измерений $\pm 6 * SKO_Zi$ ($i=1, \dots, 13$).

Группа №2.5 – подсистемы, вырабатывающие флаги недостоверности измерений после сравнения невязок с расчётным уровнем погрешностей измерений, а также вектор измерений ФК после зануления недостоверных измерений, идущий в задачу оценивания вектора состояния системы.

Группа №2.6 – формирование матрицы измерений ОФК с учётом частоты их поступления в задачу фильтрации ($1/Tz$).

Группа №2.7 – формирование матрицы динамики системы (F) и переходной матрицы на частоте решения ковариационного канала ($Fkper_dT$) и частоте работы оценочного канала ФК ($Fkper_Tz$).

Группа №2.8 – подсистема, содержащая алгоритмы работы кавариационного канала ФК, на выход которой поступают матричный коэффициент усиления ФК ($K(k+1)$) на шаге $T_z(k+1)$, ковариационная матрица ошибок оценок ФК ($P(k+1)$), расчётное значение СКО погрешностей измерений ФК (Σ_Z).

Группа №2.9 – подсистема, реализующая алгоритмы оценочного канала ФК.

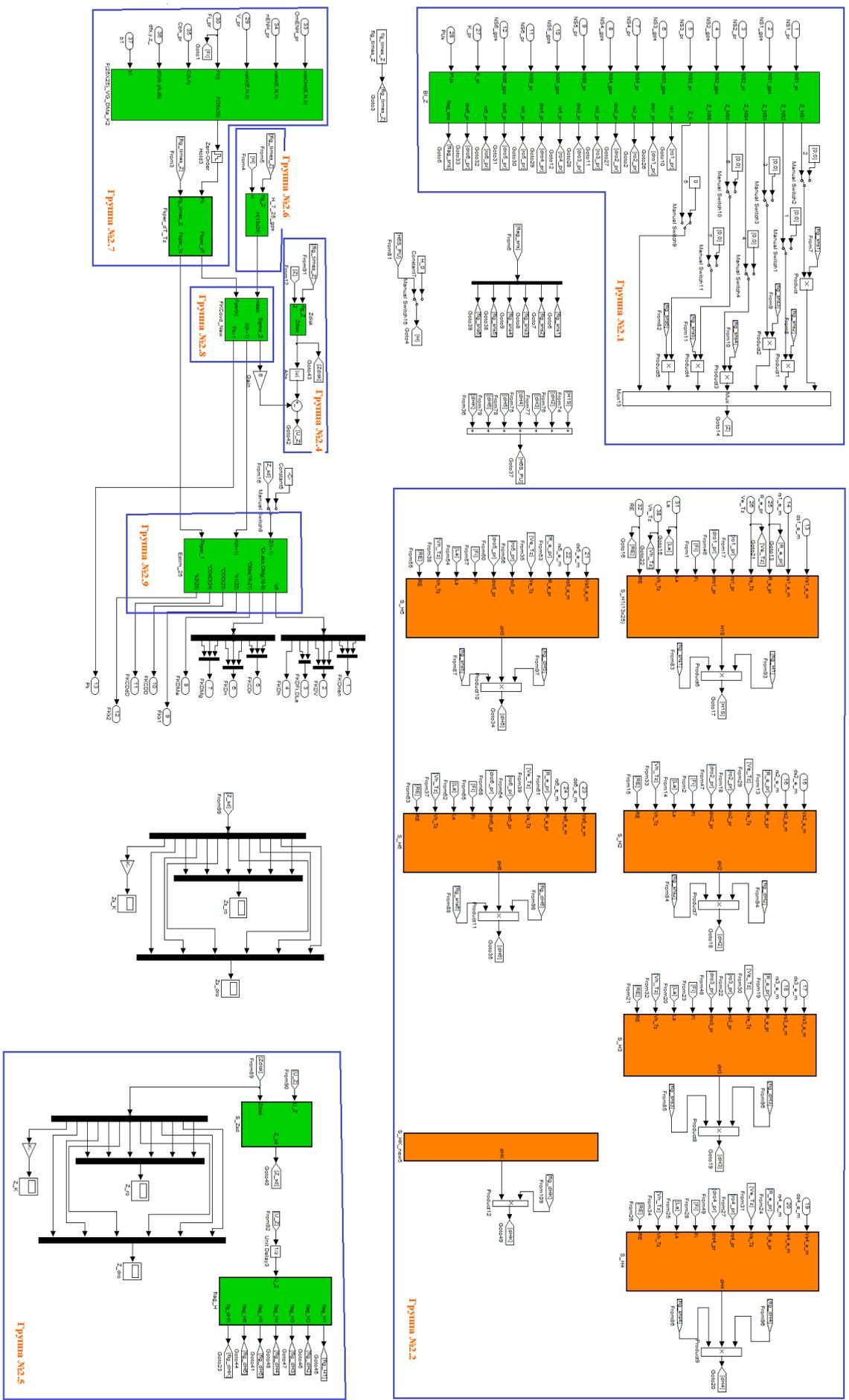


Рис.П2.9 Блоки задачи калмановской фильтрации ИСОН

Описание имитационной модели ISON_real_phase_P3

Имитационная модель, включает четыре типа файлов:

- загрузочные *.m-файлы;
- *.m-файлы, представляющие собой функции;
- собственно файл имитационной модели *.mdl;
- *.m-файлы просмотра результатов моделирования.

В каталоге содержится два файла с функциями:

- *crt_vekt_02.m* (извлечение необходимых элементов из входного массива данных);

- *range_number_03.m* (по заданному критерию функция выделяет данные необходимого количества различных НС и закрепляет за ними определённые места в выходном массиве, не допуская перескока данных с места на место при смене приёмного канала ПА СНС: изначально при приёме данных ПА СНС приём сигналов НС производился в случайном порядке в свободный на время приёма канал).

Описание структуры и содержания необходимых *.m-файлов с достаточной степенью детализации приведены в соответствующих комментариях в самих файлах. Здесь ограничимся лишь перечислением их состава.

Рассматриваемая имитационная модель содержит два загрузочных script-файла, запускаемых друг за другом в следующем порядке:

1. *loader_Ladoga300809ZfSL_Em_NS10_mazhNS.m*;
2. *IS26re41_MMGL_10NS_2ZfdatXo_Lad_300809gb.m*,

а также соответствующие файлы просмотра результатов моделирования (их назначение и выводимые ими результаты следуют из их названия и тех *.mat-файлов, к которым они обращаются).

При повторении моделирования необходимо заново выполнить загрузочные script-файлы, что позволит правильно инициализировать содержащиеся в них глобальные переменные (помеченные оператором *global*).

Далее рассмотрим описание имитационной модели *IS26re515aEm3_MMGL_10NS_2Zf_Xo_Lad.mdl*.

Функциональные блоки имитационной модели условно разбиты на соответствующие группы (от №1 до №9, рис.ПЗ.1). С целью обеспечения единства излагаемого в приложениях материала в данном приложении сохранён тот же принцип в обозначениях, что и в Приложении П1: основные блоки маркированы цветом и объединены в соответствующие группы:

- тёмно-серым обозначены блоки, задающие как движение объекта и эталонные показания инерциальных ЧЭ, так и параметры движения навигационных спутников (их эфемериды), параметры движения антенн ПА СНС, первые разности фазовых измерений двухантенной ПА СНС;

- зелёным обозначены блоки, выполняющие основные функциональные задачи ИСОН (задачу ориентации и навигации, задачу калмановской фильтрации совместной обработки данных ИИМ и ПА СНС);

- оранжевым обозначены блоки вторичной обработки данных, вырабатываемых блоками других групп;

- жёлтым обозначены блоки, предназначенные для отображения результатов моделирования и обработки результатов моделирования с целью более удобного их представления для последующего анализа результатов.

Группы функциональных блоков имеют следующее назначение.

К группе №1, №3 относится только один блок, содержащий блоки чтения массивов реальных данных ЧЭ ИИМ, массивов реальных данных об эталонных кинематических параметрах движения объекта.

К группе №2 относятся блоки основных функциональных задач ИСОН (задачи ориентации и навигации, задачи совместной обработки данных ИИМ и ПА СНС).

К группе №4 принадлежат блоки чтения массивов реальных данных эфемерид десяти наблюдаемых НС.

К группе №6 принадлежат блоки чтения массивов реальных данных первых разностей фаз, определяемых ПА СНС.

К группе №7 относятся блоки формирования расчётных значений первых разностей фаз.

К группе №8 относятся блоки формирования вторых разностей фаз ПА СНС и их расчётных значений.

К группе №9 относятся блоки индикации результатов моделирования.

Отсутствие в описании некоторых из групп (4, 5) обусловлено отсутствием соответствующих функциональных задач в модели, по сравнению с наиболее полной в этом отношении моделью *SS_IS29mod3_MMG_6NS_2ZfNew30.mdl* (Приложение П1).

Далее приводятся описание входных и выходных переменных блоков каждой из групп.

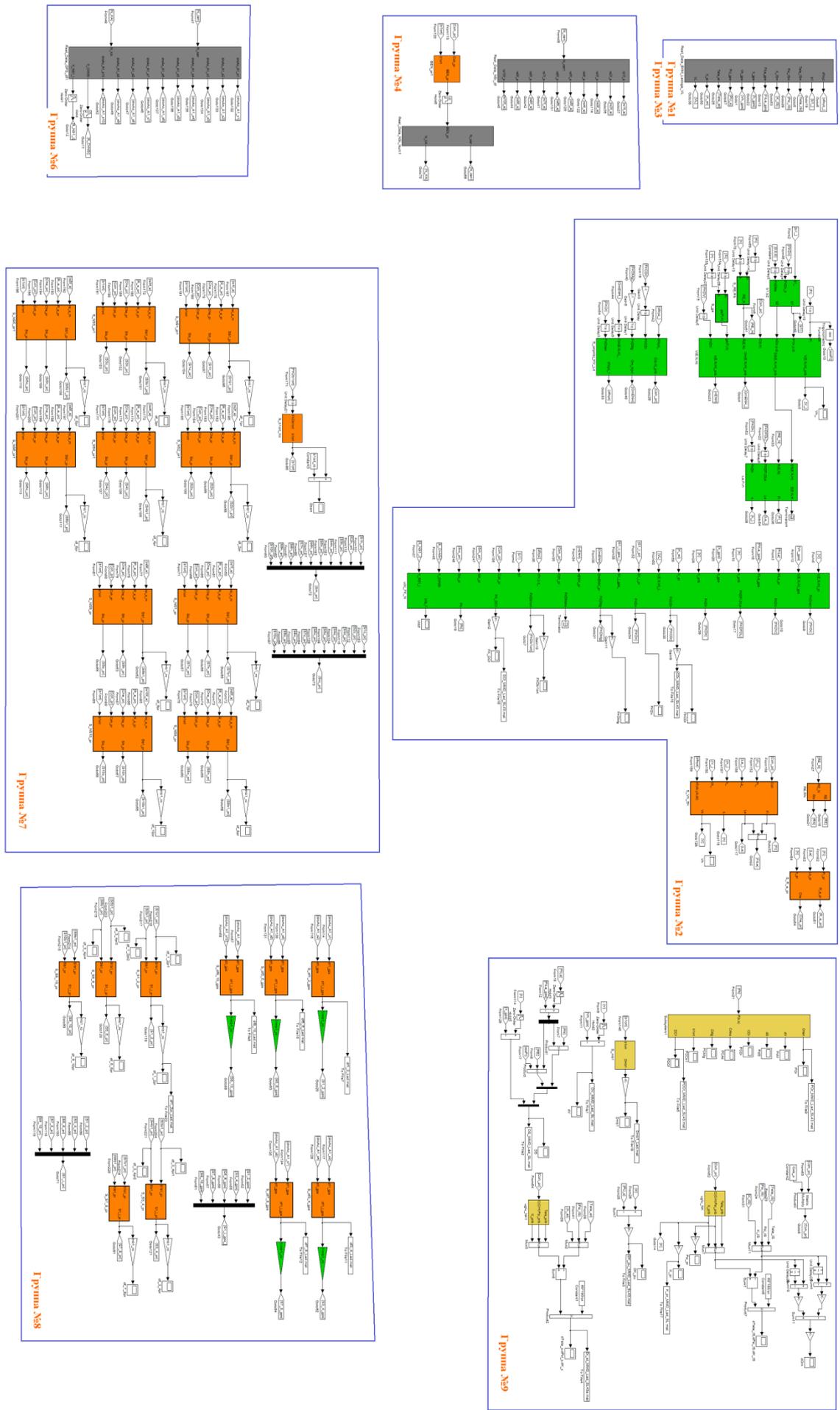


Рис.ПЗ.1 Функциональные блоки имитационной модели ISON_real_phase_P3

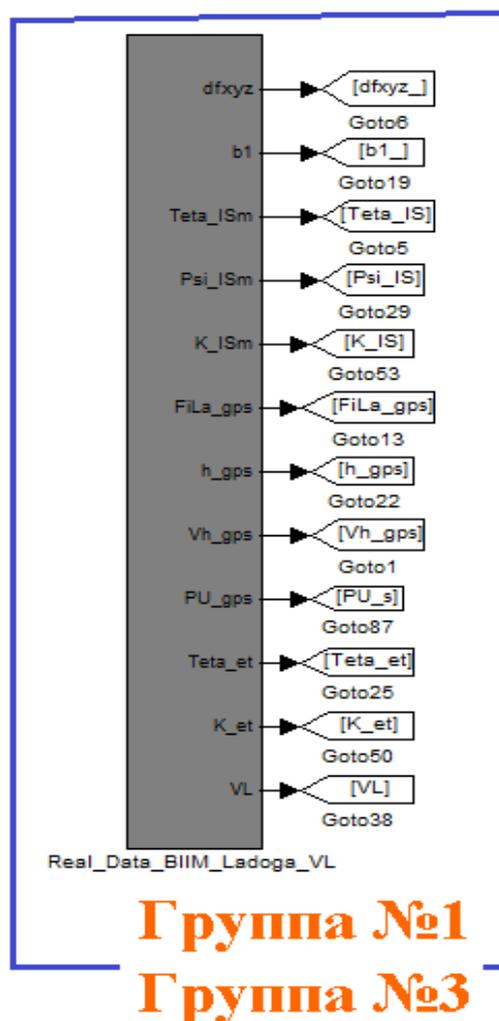
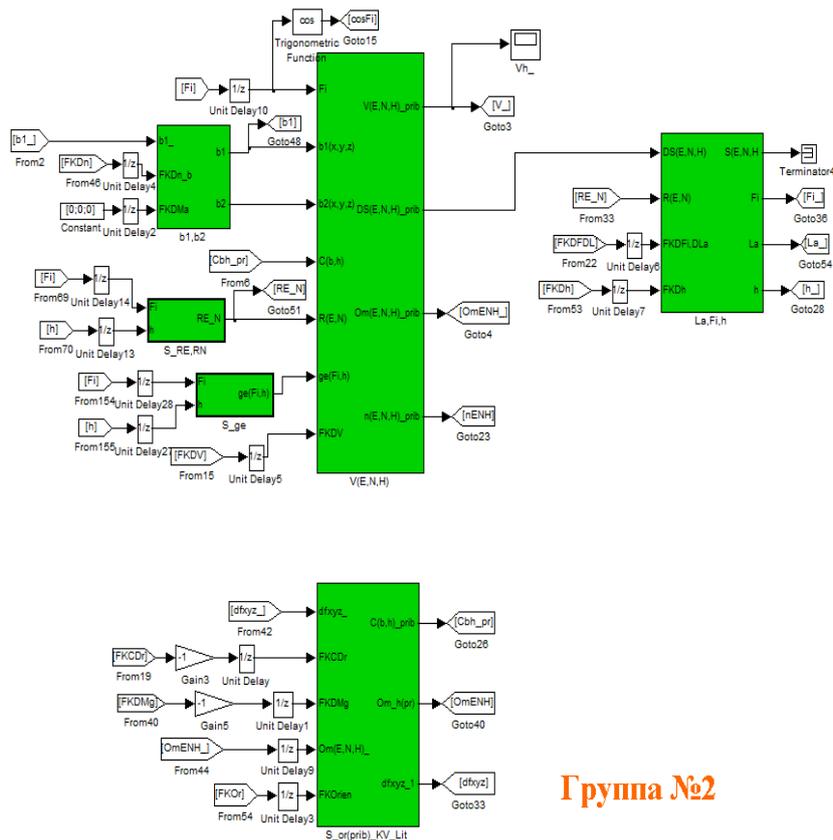


Рис. ПЗ.2 Группы блоков №1, №3

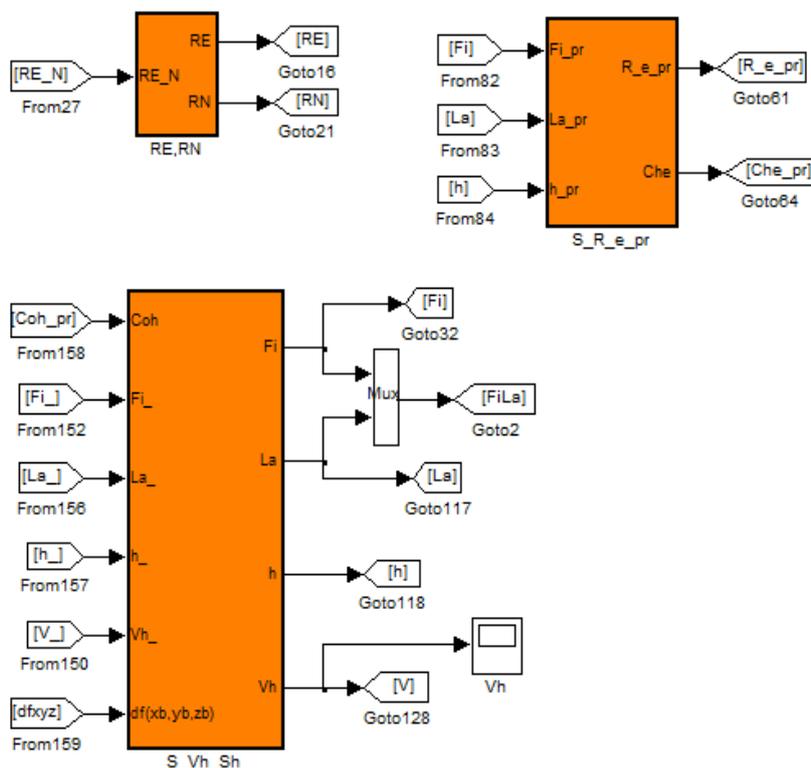
Наименование канала	Примечание
dfxyz_	Вектор приращений на такте dT первых интегралов показаний гироскопов ИИМ
b1_	Вектор приращений на такте dT первых интегралов показаний акселерометров ИИМ
Teta_IS, Psi_IS, K_IS	Значения углов бортовой, килевой качки и курса соответственно, полученные по данным эталонной ИСОН на ВОГ
FiLa_gps	Эталонные сферические координаты места расположения ИИМ
h_gps	Эталонное значение относительной высоты места расположения ИИМ
Vh_gps	Эталонные абсолютные линейные скорости в месте размещения ИИМ в осях ГСТ
PU_s	Эталонное значение путевого угла
Teta_et, K_et	Эталонные значения углов бортовой качки и курса, полученные по данным двухантенной ПА СНС, при поперечном расположении антенной базы
VL	Вектор составляющих линейной скорости объекта в проекциях на оси ГСТ по данным эталонной ИСОН. Скорость имитирует показания относительного лага



Группа №2

Рис. ПЗ.3 Группа блоков №2

Наименование канала	Примечание
V_	Приборные (выработанные в ИСОН) значения абсолютной линейной скорости движения ИИМ в осях ГСТ
Sh_pr	Приборные значения относительных перемещений (относительно стартовой точки) ИИМ в осях ГСТ
Fi_	Приборное значение широты места
La_	Приборное значение долготы места
h_	Приборное значение относительной высоты места
OmENH_	Приборное значение угловой скорости движения географического сопровождающего трёхгранника
nENH	Приборные значения кажущегося ускорения в проекциях на оси ГСТ
Cbh_pr	Приборное значение матрицы ориентации связанной с ИИМ СК относительно осей ГСТ
OmENH	Приборное значение угловой скорости движения географического сопровождающего трёхгранника с учётом оценок погрешностей решения задачи ориентации, полученных в результате выполнения задачи фильтрации ФК
dfxyz	Приборное значение приращения интеграла от абсолютной угловой скорости на такте решения задачи ориентации dT, вычисленное по данным гироскопов с учётом оценок погрешностей гироскопов, вырабатываемых в результате решения задачи фильтрации ФК ИСОН (в блоке "S_or(prib)_KV_Lit" при проведении предварительного интегрирования учитываются постоянные значения смещения нуля, погрешности масштабного коэффициента, неортогональности осей гироскопов)
b1	Приборное значение приращения первого интеграла кажущегося ускорения на такте решения навигационной задачи dT, вычисленное по показаниям акселерометров с учётом оценок погрешностей акселерометров, вырабатываемых в результате решения задачи фильтрации ФК ИСОН (в блоке "b1,b2" при проведении предварительного интегрирования учитываются постоянные значения смещения нуля, погрешности масштабного коэффициента, неортогональности осей акселерометров)
RE_N	Приборные значения радиусов кривизны принятого эллипсоида соответственно в плоскости первого вертикала и плоскости меридиана места



Группа №2

Рис. ПЗ.5 Группа блоков №2

Наименование канала	Примечание
RE	Приборное значение радиуса кривизны эллипсоида в плоскости первого вертикала
RN	Приборное значение радиуса кривизны эллипсоида в плоскости меридиана места
R_e_pr	Приборные значения декартовых координат ИИМ на оси общеземной экваториальной СК
Che_pr	Приборное значение матрицы ориентации ГСТ относительно общеземной экваториальной СК
Fi, La	Приборные значения широты и долготы места, приведённые к месту расположения антенны ПА СНС
h	Приборное значение относительной высоты места, приведённой к месту расположения антенны ПА СНС
V	Вектор приборных (выработанных в ИСОН) значений проекций абсолютной линейной скорости движения ИИМ в осях ГСТ, приведённых к месту расположения антенны ПА СНС

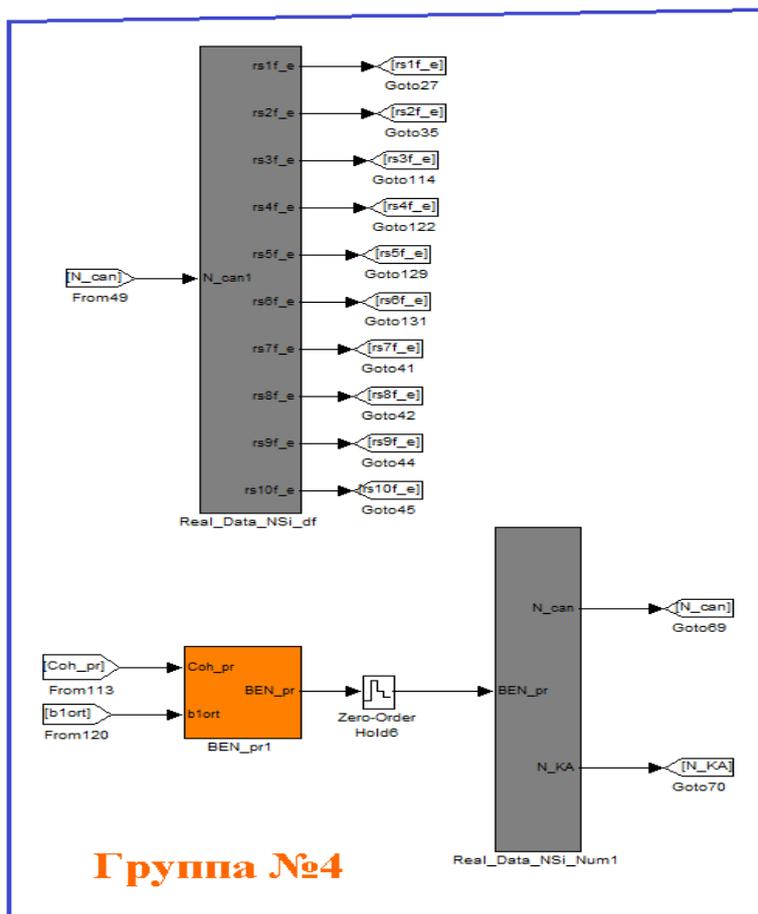


Рис. ПЗ.6 Группа блоков №4

Наименование канала	Примечание
rsif_e (i=1,...,10)	Эталонные значения проекции радиуса-вектора i-го НС на оси инерциальной СК (эфемеридная информация)
N_can	Вектор 5x1 номеров приёмных каналов (колонок читаемого файла данных) ПА СНС
N_KA	Вектор 5x1 соответствующих N_can порядковых номеров наблюдаемых НС
BEN_pr	Проекция вектора антенной базы на оси ГСТ

Примечание – В подсистеме Real_Da_NSi_Num1 в соответствующих блоках  осуществляется вызов функций crt_vekt_02.m (извлечение необходимых элементов из входного массива данных) и range_number_03.m (по заданному критерию функция выделяет данные необходимого количества различных НС и закрепляет за ними определённые места в выходном массиве, не допуская перескока данных с места на место при смене приёмного канала ПА СНС: изначально при приёме данных ПА СНС приём сигналов НС производился в случайном порядке в свободный на время приёма канал).

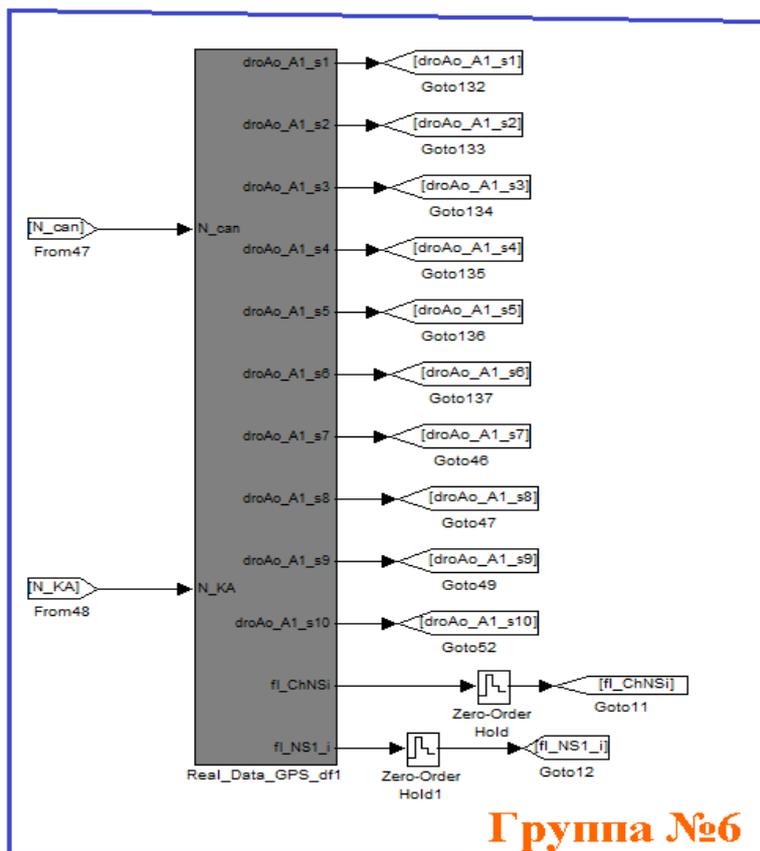


Рис. ПЗ.7 Группа блоков №6

Наименование канала	Примечание
droAo_A1_si (i=1,...,10)	Определённая в ПА СНС первая разность фаз i-го НС
fl_ChNSi (i=1,...,10)	Вектор 10x1 флагов, сигнализирующих о смене номера НС, данные которого относятся к определённой позиции в выходном массиве droAo_A1_si
fl_NS1_i (i=1,...,10)	Вектор 10x1 флагов достоверности данных НС

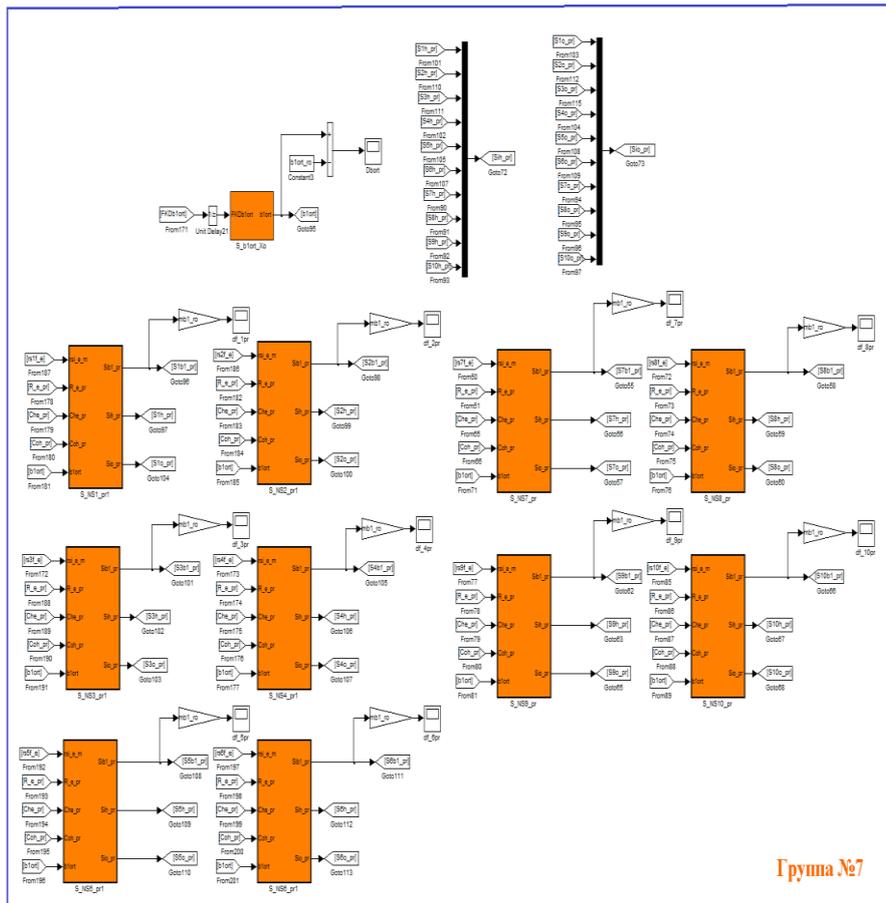


Рис. ПЗ.8 Группа блоков №7

Наименование канала	Примечание
b1ort_ro	Эталонное значение вектора антенной базы в проекциях на оси связанной с объектом системы координат (ССК)
b1ort	Приборное значение вектора антенной базы с учётом оценок погрешностей ориентации базы в осях ССК
Sib1_pr (i=1,...,10)	Расчётное (приборное) значение первой разности фаз, полученное в ИСОН
Sih_pr (i=1,...,10)	Расчётное значение направляющего косинуса направления на i-й НС в осях ГСТ (i=1,...,10)
Sio_pr (i=1,...,10)	Расчётное значение направляющего косинуса направления на i-й НС в осях объекта (i=1,...,10)

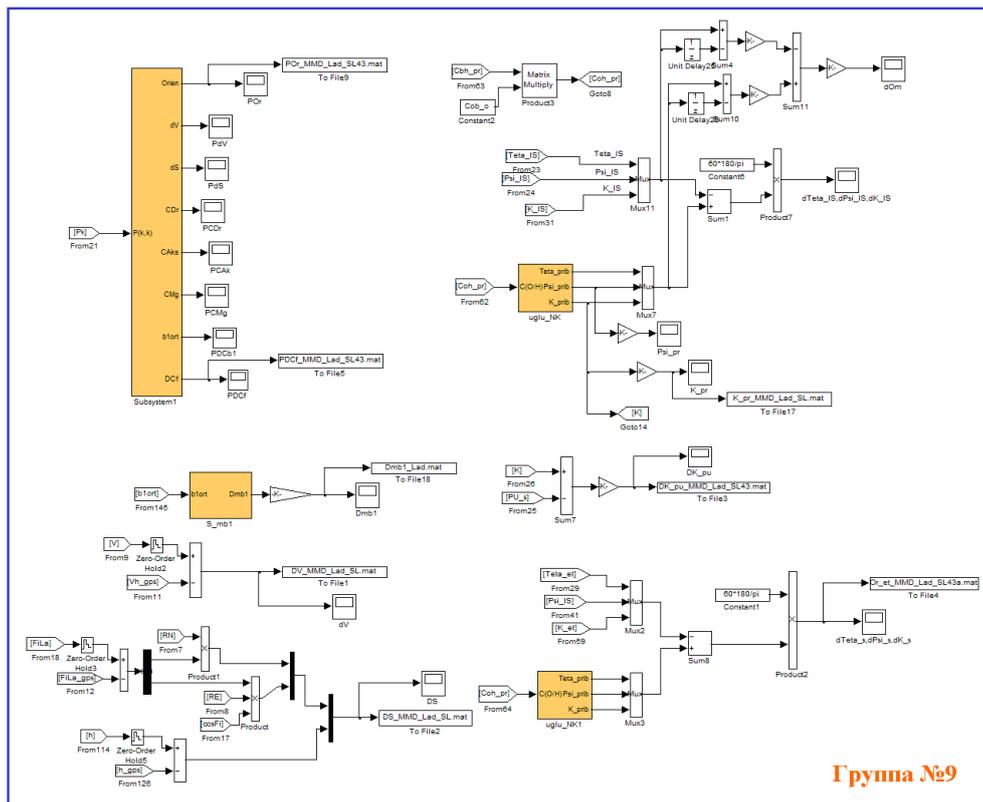


Рис. ПЗ.10 Группа блоков №9

Наименование канала	Примечание
POr	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей решения задачи ориентации ИСОН (α, β, γ)
PdV	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей решения навигационной задачи ИСОН ($\Delta VE, \Delta VN, \Delta VH$)
PdS	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей решения навигационной задачи ИСОН ($\Delta Fi, \Delta La, h$)
PCDr	Вектор СКО погрешностей оценок смещений нулей триады гироскопов ($\Delta Gxb, \Delta Gyb, \Delta Gzb$)
PCAk	Вектор СКО погрешностей оценок смещений нулей триады акселерометров ($\Delta Axb, \Delta Ayb, \Delta Azb$)
PCMg	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей масштабных коэффициентов триады гироскопов ($\Delta Mgb, \Delta Mgyb, \Delta Mgz$)
PDCb1	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей привязки антенной базы двухантенной ПА СНС к осям объекта ($\Delta b1y, \Delta b1z$)
PDCf	Вектор СКО погрешностей оценок погрешностей фазовых измерений ПА СНС ($\Delta Cf4_1, \Delta Cf5_2, \Delta Cf6_3$)

Рассмотрим более подробно содержание наиболее сложной подсистемы, описывающей алгоритмы задачи совместной обработки данных ИИМ и ПА СНС (задачи калмановской фильтрации) и относящейся к группе №2. Внешний вид внутреннего содержания данной подсистемы приведён на рис.ПЗ.11. Как и в Приложении П1 блоки подсистемы объединены по функциональному признаку, что обозначено цветом. Нумерация и обозначения блоков сохранены такими же, как и у модели Приложения П1 (поэтому при обозначении групп блоков пропущены отсутствующие в данной модели группы).

Группа №2.1 – подсистема, формирующая разностные измерения задачи совместной обработки данных ИИМ и ПА СНС (задачи фильтрации ОФК) и объединяющая их в единый вектор измерений (Z). Здесь происходит формирование разностных измерений по скоростям VE, VN и координатам Fi, La (Z_gps), высоте места (Z_h), курсу (Z_K), относительному лагу (Z_L), а также по разностным фазовым измерениям вторых разностей фаз ($zs1_2, zs3_4, zs5_6, zs7_8, zs9_10$). Недостоверные измерения исключаются из рассмотрения занулением либо автоматически (по значениям флагов $fl_NS1_2, fl_NS3_4, fl_NS5_6, fl_NS7_8, fl_NS9_10$, являющихся элементами вектора fl_NS1_i), либо в ручном режиме при переключении соответствующих ключей .

Группа №2.3 – подсистемы данной группы реализуют алгоритмы формирования матриц измерений 13×26 ($dHS1_2, dHS3_4, dHS5_6, dHS7_8, dHS9_10$) по вторым разностям фазовых измерений. При формировании матриц учитывается недостоверность измерений, формируемая по флагу fl_NS1_i и по результатам анализа невязок разностных измерений ($flg_dHS1_2, flg_dHS3_4, flg_dHS5_6, flg_dHS7_8, flg_dHS9_10$, блоки групп 2.4 и 2.5). Флаг flg_H1_8 (группа 2.5) определяет достоверность всех измерений, кроме фазовых (8 параметров).

Группа №2.4 – данная подсистема реализует алгоритм сравнения невязок (Z) разностных измерений с расчётными СКО погрешностей измерений, умноженными на множитель “10”, позволяющий достичь заданного уровня доверительной вероятности для диапазона возможных значений погрешности измерений $\pm 10 * SKO_Zi$ ($i=1, \dots, 13$).

Группа №2.5 – подсистемы, вырабатывающие флаги недостоверности измерений после сравнения невязок с расчётным уровнем погрешностей измерений, а также вектор измерений ФК после зануления недостоверных измерений, идущий в задачу оценивания вектора состояния системы.

Группа №2.7 – формирование матрицы динамики системы (F) и переходной матрицы на частоте решения ковариационного канала ($Fkper_dT$) и частоте работы оценочного канала ФК ($Fkper_Tz$).

Группа №2.8 – подсистема, содержащая алгоритмы работы ковариационного канала ФК, на вход которой поступают матричный коэффициент усиления ФК ($K(k+1)$) на шаге Tz ($k+1$), ковариационная матрица ошибок оценок ФК ($Pk+1$), расчётное значение СКО погрешностей измерений ФК ($Sigma_Z$).

Группа №2.9 – подсистема, реализующая алгоритмы оценочного канала ФК.

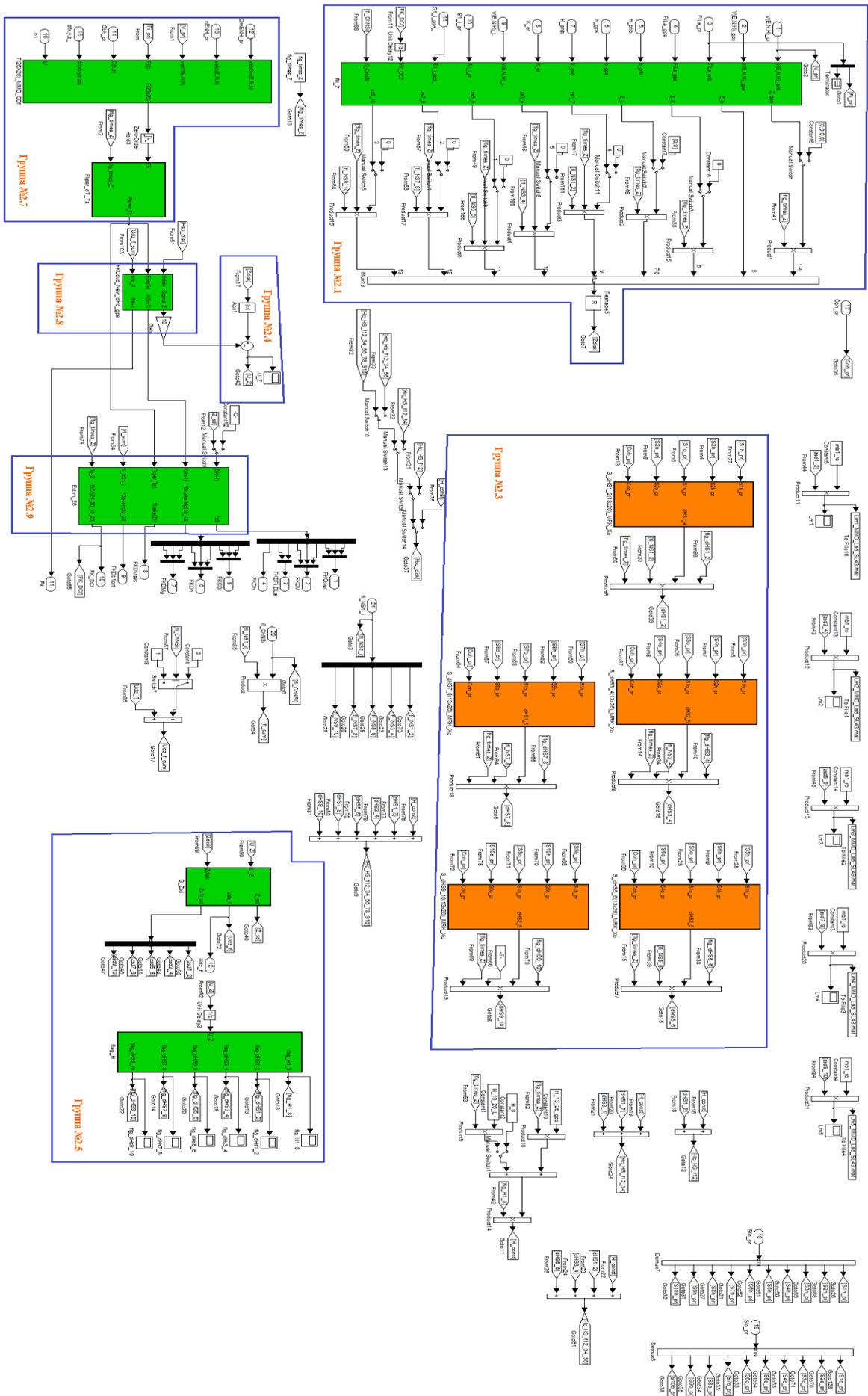


Рис.ПЗ.11 Блоки задачи калмановской фильтрации ИСОН

ЛИТЕРАТУРА

1. **Г.И. Емельянцев, А.П. Степанов** Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации / Под общей ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова - СПб.: ГНЦ РФ АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2016. - 394 с.
2. Лекция для магистров проф. Г. Емельянцева: ИСОН с высоким уровнем интеграции для высокоманевренных подвижных объектов (L1c_Mag).
3. Лекция для магистров проф. Г. Емельянцева: Использование фазовых измерений в задаче ориентации современных ИСОН. GPS-компас «ИСОН-1» для морских судов (L2_3e_Mag).
4. Лекция для магистров проф. Г. Емельянцева: Использование фазовых измерений в задаче ориентации современных ИСОН. GPS-компас «ИСОН-1» для морских судов (L2_3e_Mag).
5. **Блажнов Б.А., Емельянцев Г.И., Коротков А.Н., Кошаев Д.А., Семенов И.В., Степанов А.П.** и др. Интегрированная инерциально-спутниковая система ориентации и навигации, построенная по сильносвязанной схеме. XVI-ая Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, сборник материалов. 2009. С. 153-162.
6. **Емельянцев Г.И., Несенюк Л.П., Блажнов Б.А., Коротков А.Н., Степанов А.П.** Об особенностях построения интегрированной инерциально-спутниковой системы для объектов,двигающихся в начальный период по баллистической траектории// Гироскопия и навигация.-2009.-№1(64). -С. 9-21.
7. **Степанов О.А., Кошаев Д.А.** Исследование методов решения задачи ориентации с использованием спутниковых систем //Гироскопия и навигация.-1999.-№2(25). –С. 30-55
8. **Емельянцев Г.И., Блажнов Б.А., Степанов А.П.** Об использовании фазовых измерений для задачи ориентации в интегрированной инерциально-спутниковой системе//Гироскопия и навигация.-2010.-№1(68). -С. 26-35.
9. **Блажнов Б.А., Евстифеев М.И., Емельянцев Г.И., Степанов А.П.** и др.. GPS-компас с автономным режимом работы. Результаты объектовых испытаний. XX-ая Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, сборник материалов, 27...30 мая, 2013. С.-Петербург, Россия. С. - 99-103.
10. **Анучин О.Н., Емельянцев Г.И.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. Изд. ЦНИИ «Электроприбор», С.-Пб, 1999 - 357 с.
11. **Бакитько Р.В., Булавский Н.Т., Горев А.П.** и др. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования/ Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 3-е перераб. – М.: Радиотехника, 2005. -688с.
12. www.imar.de

13. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч1. Введение в теорию оценивания.- 2008.-500 с; Ч2. Введение в теорию фильтрации. -2012. -417 с. - СПб. - ЦНИИ "Электроприбор".
14. **Ривкин С.С., Ивановский Р.Ю., Костров А.В.** Статистическая оптимизация навигационных систем. Л.: Судостроение.- 1976.
15. **Кошаев Д.А.** Определение курса по фазовым измерениям в условиях ограниченной видимости навигационных спутников на неподвижном основании //Гироскопия и навигация.-2013.-№1(80). –С. 64-78.
16. **Кошаев Д.А.** Проблемы вторичной обработки данных ГНСС: недостаток и переизбыток информации. Сб.: Материалы пленарного заседания 7-й Российской мультikonференции по проблемам управления. ЦНИИ «Электроприбор». СПб.- 2014. С. -74-89.
17. **Степанов О.А., Кошаев Д.А.** Исследование методов решения задачи ориентации с использованием спутниковых систем //Гироскопия и навигация.-1999.-№2(25). –С. 30-55.

Миссия университета – открывать возможности для гармоничного развития конкурентоспособной личности и вдохновлять на решение глобальных задач.



КАФЕДРА ИНФОРМАЦИОННО-НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Кафедра «Информационно-навигационные системы» является одной из старейших в университете.

В 30-е гг. XX века отечественная промышленность приступила к созданию новых навигационных приборов – гирокомпасов, лагов, эхолотов. В связи с этим в 1934 г. рядом предприятий и организаций было внесено предложение во Всесоюзный совет народного хозяйства (ВСНХ) СССР о подготовке необходимых инженерных кадров. В сентябре 1937 г. была создана кафедра навигационных приборов. С 1937/38 учебного года на кафедре была начата подготовка специалистов.

В разработке профиля кафедры принимали участие видные ученые и специалисты промышленности и флота страны, в том числе академик А.Н. Крылов, профессора Б.И. Кудревич и К.С. Ухов, доцент Д.Н. Иконников, инженеры М.М. Блюк, М.А. Шиф и многие другие.

Первым заведующим кафедрой стал профессор Л.П. Шишелов, занимавший в то время должность декана факультета «А» (точной механики).

В том же 1937 г. на кафедре организована лаборатория, заведующим которой был назначен П.А. Ильин. Он окончил ЛИТМО в 1931 г. в числе первых выпускников и, приобретя опыт работы на производстве, в 1936 г. поступил в аспирантуру. С этого момента вся его деятельность была связана с кафедрой и направлена на совершенствование учебного процесса. Благодаря его активной деятельности и связям с промышленностью лаборатория была оснащена современными на тот период навигационными приборами, а учебный процесс обеспечен необходимыми учебными пособиями. В 1940 г. состоялся первый выпуск инженеров по навигационным приборам.

Во время Великой Отечественной войны в период блокады Ленинграда на время эвакуации ЛИТМО лабораторное оборудование кафедры оставалось в осажденном городе и было сохранено. Поэтому практически сразу после реэвакуации института в 1944 г. на кафедре были возобновлены занятия.

С 1945 г. по 1962 г. кафедру возглавлял крупный ученый в области навигации, гидрографии, штурманских приборов, доктор технических наук, профессор К.С. Ухов, который при поддержке профессора Б.И. Кудревича основал научно-педагогическую школу «Навигационные приборы». При нем в 1956 г. в связи с изменением номенклатуры специальностей кафедра была переименована в кафедру гироскопических и навигационных приборов. Чтобы удовлетво-

ритель потребности промышленности, в эти годы на кафедре обучалось от 4 до 5 групп студентов, включая группы вечернего образования.

С 1963 г. по 1970 г. кафедрой заведует (по совместительству) главный инженер Ленинградского научно-производственного объединения «Азимут», лауреат Ленинской премии, доктор технических наук, профессор С.Ф. Фармаковский. В этот период коллектив кафедры значительно укрепил и расширил связи с промышленностью. В гироскопическом приборостроении получают развитие газовые опоры как в осях подвеса, так и в качестве главных опор ротора гироскопа. На кафедре гироскопических и навигационных приборов разрабатываются теоретические основы расчета и проектирования газодинамических подшипников. Результаты использованы в НПО «Азимут» и других организациях.

Во второй половине 60-х гг. под руководством профессора П.А. Ильина разворачиваются работы по исследованию и разработке лазерных гироскопов. Для проведения работ по договорам с Московским институтом электроавтоматики при кафедре в 1966 г. создается отраслевая лаборатория квантовой гиromетрии под научным руководством с.н.с. Г.М. Кузнецова.

В 1969 г. в издательстве «Машиностроение» публикуется монография д.т.н., профессора М.А. Сергеева «Наземные гирокомпасы». В 1970 г. он избирается по конкурсу заведующим кафедрой и руководит ею до 1982 г. В промышленности ведутся работы по созданию космических летательных аппаратов, сверхзвуковых самолетов, атомных подводных лодок, межконтинентальных ракет. В этих условиях кафедра расширяет профиль подготовки специалистов и в 1973 г. переименовывается в кафедру бортовых приборов управления.

С 1982 г. по 1991 г. кафедру возглавляет профессор В.А. Каракашев, создавший совместно со своими учениками О.Н. Анучиным и Г.И. Емельянцевым (впоследствии доктора наук) научно-педагогическую школу «Инерциальные навигационные системы». На кафедре разрабатываются новые учебные планы, совершенствуется преподавание дисциплин, большое внимание уделяется внедрению в учебный процесс вычислительной техники. Преподаватели кафедры проходят переподготовку и повышение квалификации в области вычислительной техники. На кафедре ведутся научно-исследовательские работы совместно и по заказам навигационно-гидрографического института, ЦНИИ «Электроприбор», завода «Баррикада» в Волгограде.

С 1991 г. кафедру возглавляет директор ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор» (в настоящее время АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»), лауреат Ленинской и Государственной премий, в то время член-корреспондент, впоследствии академик РАН В.Г. Пешехонов. Под руководством В.Г. Пешехонова кафедра ориентируется на подготовку специалистов в области создания приборов и систем, измеряющих перемещения, скорости и ускорения морских подвижных объектов и образующих интегрированные навигационно-управляющие комплексы судов и кораблей различного назначения, а также комплексы пространственной ориентации и стабилизации информационно-измерительной аппаратуры на их борту. В соответствии с произошедшими изменениями в научной и педагогической деятельности кафедры в апреле 2003 г. кафедра получила свое современ-

ное наименование – она была переименована в кафедру информационно-навигационных систем.

По инициативе академика В.Г. Пешехонова, начиная с 2004/05 учебного года, студенты и преподаватели кафедры активно включаются в межвузовскую программу интенсивной подготовки специалистов, которая реализуется на базе ЦНИИ «Электроприбор». С этой целью между ЦНИИ «Электроприбор» и тремя ведущими университетами города (СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», СПбГУ ИТМО и СПб ГУАП) заключается и успешно реализуется соглашение о межвузовской углубленной подготовке инженерных кадров и проведении совместных научных исследований в области навигации на базе ЦНИИ «Электроприбор». В сентябре 2008 г. кафедра преобразуется в базовую при ЦНИИ «Электроприбор».

За работы в области объединения усилий вузов при подготовке специалистов коллективу, в состав которого вошли профессора СПб ГЭТУ «ЛЭТИ» Ю.В. Филатов и Ю.А. Лукомский, а также д.т.н. О.А. Степанов (ЦНИИ «Электроприбор»), в 2010 г. присуждается премия Правительства Санкт-Петербурга «За выдающиеся достижения в области высшего и среднего профессионального образования за 2010 г.» в области интеграции образования, науки и промышленности.

Укрепляется международное сотрудничество, в частности с международной общественной организацией «Академия навигации и управления движением», учрежденной в 1995 г. как общественное объединение ведущих ученых в области навигации и управления движением и в настоящее время насчитывающей более 400 членов, работающих в различных университетах и организациях десяти стран (России, Украины, Германии, США, Франции, Китая, Южной Кореи, Белоруссии, Турции, Индии). Ведущие профессора кафедры читают лекции в Китае и Финляндии, активно выступают с докладами на авторитетных международных и российских конференциях.

В 2011 г. в ЦНИИ «Электроприбор» открывается новый комплекс учебных помещений, включающий лабораторию, компьютерный класс и зону отдыха для студентов. Лаборатория, оснащенная современным оборудованием для проведения лабораторных работ, фактически является центром коллективного пользования для ведущих вузов города, готовящих специалистов в области навигации и управления.

В 2012 г. кафедра информационно-навигационных систем отметила свой 75-летний юбилей.

Кафедра активно участвует в реализации Программы повышения конкурентоспособности Университета ИТМО, в частности, в 2014 г. в рамках открытого конкурса создана международная научная лаборатория «Интегрированные системы ориентации и навигации» (руководители: Степанов О.А. – профессор, д.т.н., заместитель заведующего кафедрой; Троммер Г.Ф. – профессор, директор Института оптимизации систем Технологического университета Карлсруэ (Германия)). Ее сотрудники проводят исследования по различным направлениям, связанным с научной тематикой кафедры. За последнее время выполнены работы в рамках семи грантов, поддержанных Российским фондом фундамен-

тальных исследований, и работы по крупному проекту, поддержанному Российским научным фондом, на тему «Решение проблемы высокоточных измерений гравитационного поля в труднодоступных районах Земли с подвижных объектов». В 2014–2016 гг. по результатам научных исследований опубликовано значительное количество печатных работ, в том числе более 120 публикаций, рецензируемых в базах Scopus и Web of Science.

Начиная с 2018/2019 учебного года в ходе структурных преобразований в Университете ИТМО образовательные программы бакалавриата и магистратуры кафедры – «Управление движением и навигация» и «Системы управления движением и навигации» (научный руководитель программ – д.т.н. проф. Степанов О.А.) теперь реализуются на факультете Систем управления и робототехники Университета ИТМО, входящего в состав мегафакультета Компьютерных технологий и управления. Сама же кафедра с 1 сентября преобразована в Институт информационно-навигационных систем, который входит в структуру мегафакультета. Такое преобразование было предложено лишь нескольким кафедрам, на которых выполняется значительный объем научных исследований и реализуются уникальные совместные образовательные программы с ведущими предприятиями города. Возглавил Институт ИНС, как и ранее кафедру, генеральный директор АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», академик РАН В.Г. Пешехонов.

Реализации образовательных программ, направленных на подготовку специалистов области навигации и управления движением, на основе тесного взаимодействия Института ИНС с «ЦНИИ «Электроприбор», обеспечивает все необходимые условия для освоения важной профессии, связанной с созданием информационно-навигационных систем, и проведением в этой области научных исследований на современном уровне.

Емельянцев Геннадий Иванович
Степанов Алексей Петрович
Медведков Андрей Александрович

**ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ИНЕРЦИАЛЬНО-
СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ
ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Дизайн обложки

Н.А. Потехина

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49