

УДК 681.586.325

## **Комплексная навигационная система летательного аппарата**

А.Ю. Мишин, О.А. Фролова, Ю.К. Исаев, А.В. Егоров

### **Аннотация**

Объектом исследований является комплексная информационно-измерительная система перспективного беспилотного летательного аппарата, включающая бесплатформенную инерциальную навигационную систему, прибор спутниковой навигации и радиотехническую систему измерения высоты и составляющих скорости). Целью исследований является разработка идеологии и программно-алгоритмических решений создания комплексной системы, способной непрерывно обеспечивать достоверной навигационной информацией с требуемой точностью систему управления беспилотного летательного аппарата во всех условиях его функционирования. В работе проведен синтез математических моделей инерциальных датчиков первичной информации и систем, разработаны структурно-информационная схема и логика функционирования программно-математического обеспечения комплексной системы, приведены результаты математического моделирования разработанных алгоритмов на цифровом комплексе математическом.

### **Ключевые слова**

Бесплатформенная инерциальная навигационная система; беспилотный летательный аппарат; спутниковая навигация; фильтр Калмана.

### **Введение**

В соответствие с техническим заданием на разработку комплексная навигационная система (КНС) должна осуществлять совместную обработку информации бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), прибора спутниковой навигации (ПСН) и радиотехнической системы измерения высоты и составляющих скорости (РВиС). При этом основная задача, решаемая КНС – выработка для системы управления беспилотного лета-

тельного аппарата (БПЛА) достоверной навигационной информации с требуемыми точностными и динамическими характеристиками.

Совместная обработка информации должна осуществляться с учетом свойств, характеристик и погрешностей указанных измерителей параметров движения. Использование математических моделей ДПИ, БИНС, ПСН и РВиС, адекватно характеризующих их функционирование и погрешности позволит правильно осуществить разработку алгоритмов совместной обработки информации и провести корректное математическое моделирование и оценку точности КНС во всех условиях применения БПЛА.

### Математические модели БИНС

Инерциальные датчики первичной информации, входящие в состав блока чувствительных элементов БИНС (разработка ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА»):

- трехосный блок акселерометров, измеряющий параметры линейного движения объекта относительно инерциального пространства (кажущееся ускорение  $\vec{a}_{k1}$ );
- три одноосных лазерных гироскопа, измеряющих параметры углового движения объекта относительно инерциального пространства (угловую скорость  $\vec{\omega}_1$ ).

Наиболее значимые компоненты, определяющие инструментальные ошибки:

- смещение нулевого сигнала;
- ошибка масштабного коэффициента преобразования;
- неортогональности измерительных осей датчиков;
- случайный уход.

БИНС является основным измерителем параметров траекторного движения и ориентации в КНС и обеспечивает непрерывное вычисление и выдачу потребителю (системе управления БПЛА) требуемой навигационной информации [1].

При комплексировании БИНС, ПСН и РВиС в качестве уравнений состояния фильтра совместной обработки информации принимается модель ошибок КНС, включающая погрешности указанных систем. С учетом известных уравнений инерциальной навигации [2, 3] имеем следующие уравнения для ошибок БИНС в нормальной земной системе координат (без учета нелинейных составляющих и малозначащих компонент)

$$\begin{cases} \Delta \dot{\vec{R}}_g = \Delta \vec{V}_g \\ \Delta \dot{\vec{V}}_g = -\vec{\Psi} \times A_{g1} \vec{a}_{k1} + A_{g1} \Delta \vec{a}_{k1} + \Delta \vec{g}_g - 2\vec{\Omega}_g \times \Delta \vec{V}_g, \\ \dot{\vec{\Psi}} = -\vec{\Omega}_g \times \vec{\Psi} + A_{g1} \Delta \vec{\omega}_1 \end{cases}$$

где  $\Delta\vec{R}_g, \Delta\vec{V}_g, \vec{\Psi}$  - вектора ошибок по местоположению, скорости и ориентации;  
 $A_{g1}$  - матрица ориентации нормальной земной системы координат относительно связанной;  
 $\Delta\vec{g}_g$  - ошибка определения ускорения силы тяжести;  $\vec{\Omega}_g$  - угловая скорость вращения Земли;  
 $\Delta\vec{a}_{k1}, \Delta\vec{\omega}_1$  - инструментальные ошибки акселерометров и гироскопов.

### **Математическая модель ПСН**

Прибор спутниковой навигации ПСН выдает по стандартному протоколу с частотой 1 Гц пакеты навигационной информации с параметрами траекторного движения объекта (координаты, скорости), параметры привязки информации ко времени их расчета (метка времени), расчетное значение среднеквадратического отклонения ошибки координат, признаки готовности и достоверности данных.

Исследования характеристик ПСН в составе комплекса наземной обработки позволяют сформировать следующую модель ошибок навигационной информации:

- систематическая составляющая погрешности координат ( $2\sigma$ ) – не более 2 м;
- систематическая составляющая погрешности высоты ( $2\sigma$ ) – не более 12 м;
- случайная составляющая погрешности координат ( $2\sigma$ ) – не более 1 м;
- систематическая составляющая погрешности по скорости ( $2\sigma$ ) – не более 0,05 м/с;
- случайная составляющая погрешности по скорости ( $2\sigma$ ) – не более 0,03 м/с.

Случайная составляющая ПСН по проекциям вектора скорости имеет характер «белого» шума с периодом дискретизации 1 сек. Случайная составляющая ПСН по координатам местоположения соответствует выходу формирующего фильтра 2-го порядка с постоянной времени примерно 30 секунд.

Кроме приведенных статистических характеристик ПСН имеет запаздывание в выдаче навигационной информации о скорости движения, которое составляет около 1,1 сек. Запаздывание ПСН по координатам не выявлено.

### **Математическая модель РВиС**

Радиосистема измерения высоты и составляющих путевой скорости РВиС выдает данные о текущей геометрической высоте объекта и составляющих  $V_x, V_z$  путевой скорости в проекциях на связанные оси объекта (оси связанные с антенной системой), признаки исправности и достоверности информации.

Погрешности измерения высоты РВиС в соответствии с Протоколом информационного взаимодействия с РВиС составляют  $(3\sigma) (0,7 + 0,03 \text{ Нтек})$  [м], где Нтек – текущая высота движения. Погрешности измерения составляющих скорости составляют  $(3\sigma) (0,5 + 0,005 V)$  [м/с], где  $V$  – модуль скорости движения.

В соответствии с материалами разработчика канал измерения высоты имеет запаздывание в выдаче информации о текущей высоте полета  $\tau_h = 3,5 \text{ мс}$ . Канал измерения составляющих путевой скорости имеет запаздывание на уровне  $\tau_v = 400 \text{ мс}$ .

РВиС выдает проекции путевой скорости на оси, связанные с антенной системой, при этом из-за неточности установки и привязки БИНС и антенной системы в составе изделия, ориентация данного трехгранника может отличаться от связанных осей БИНС на углы порядка десятков угловых минут. Алгоритм комплексирования с РВиС должен строиться с учетом возможности идентификации углов рассогласования связанных осей БИНС и РВиС.

### Алгоритмы комплексирования БИНС и ПСН

Наиболее широкое использование в алгоритмах комплексирования находят методы динамической фильтрации Калмана [3, 4]. При формировании уравнений фильтра совместной обработки информации используется модель ошибок комплексной системы, при этом модель ошибок БИНС применяется в качестве уравнения состояния комплексующего фильтра КНС, а ошибки ПСН входят в уравнение измерений в качестве шумов.

Формирование уравнений состояния комплексующего фильтра производится применительно к конкретному типу объекта применения КНС – БПЛА, исходя из его тактико-технических характеристик и условий применения. При формировании уравнений состояния комплексующего фильтра используем следующую обобщенную модель ошибок [5]

$$\begin{cases} \Delta \dot{V}_g = -\vec{\Psi} \times A_{g1} \vec{a}_{k1} + \vec{\xi}_V, \\ \dot{\vec{\Psi}} = \vec{\xi}_\Psi \\ \dot{\tau}_{CH} = 0 \end{cases}$$

где  $\vec{\xi}_V, \vec{\xi}_\Psi$  - возмущения по скорости и ориентации,  $\tau_{CH}$  - интервал запаздывания.

Вектор состояния  $X$  фильтра включает ошибки БИНС по горизонтальным составляющим скорости, все компоненты ошибок ориентации и интервал времени запаздывания информации ПСН, а вектор возмущений включает шумы БИНС по скорости и ориентации. В качестве измерений принимаются ошибки по горизонтальным составляющим скорости.

## Алгоритмы комплексирования с РВиС

При разработке алгоритма комплексирования с РВиС можно принять несколько допущений, следующих из логики функционирования КНС: комплексирование БИНС с ПСН имеет более высокий приоритет, чем комплексирование с РВиС; начальная выставка и комплексирование с ПСН позволяют произвести оценку и компенсацию ошибок ориентации до уровня нулевых сигналов акселерометров с точностью порядка 10 угл.мин.; некомпенсированный дрейф и погрешности масштабного коэффициента лазерных гироскопов в процессе автономного полета БПЛА могут привести к дополнительным ошибкам ориентации не более 5-10 угл.мин.

С учетом приведенных допущений, целесообразно в алгоритме комплексирования с РВиС не производить оценивание и компенсацию ошибок ориентации. Таким образом, можно сформировать следующие уравнения состояния

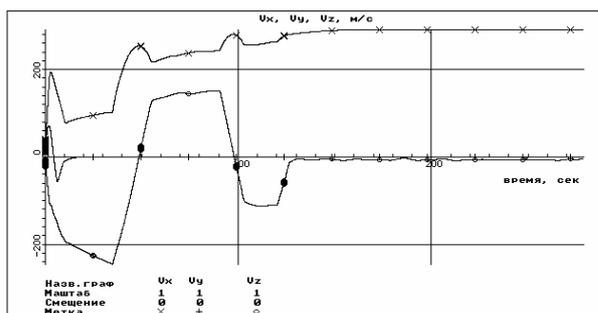
$$\begin{cases} \Delta \vec{V}_g = -A_{g1} \cdot \vec{\gamma} \times (\vec{V}_{pvc} + \vec{a}_{k1} \tau_{pvc}) \\ \dot{\vec{\gamma}} = \vec{\xi}_\gamma \\ \dot{\tau}_{pvc} = 0 \end{cases}$$

В указанной системе уравнений  $\Delta \vec{V}_g$  - разность между соответствующими проекциями скорости КНС и РВиС,  $A_{g1}$  - матрица ориентации связанных осей относительно навигационных (в плоскости горизонта - определяется только углом курса),  $\vec{a}_{k1}$  - кажущееся ускорение, измеряемое акселерометрами,  $\vec{\gamma}$  - вектор-угол рассогласования осей БИНС и РВиС.

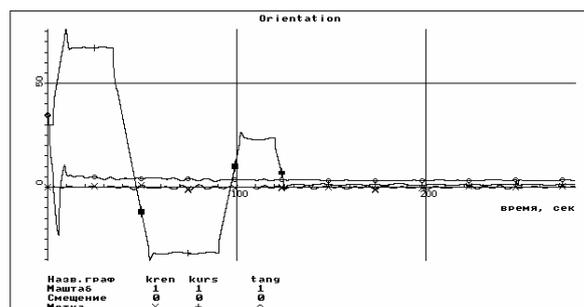
Вектор состояния динамической системы включает в себя ошибки по горизонтальным составляющим скорости, ошибку рассогласования осей и время задержки информации РВиС, в качестве измерений принимаются разности соответствующих проекций по скорости.

## Условия проведения моделирования КНС на ЦКМ

Моделирование КНС на ЦКМ проводится в несколько этапов, для моделирования используются типовые траектории движения БПЛА. В качестве иллюстрационного материала на рисунке 1 приведены графики проекций скорости и углы ориентации объекта в процессе движения по траектории.



А)



Б)

Рисунок 1 – Условия моделирования  
А) проекции скорости; Б) углы ориентации

### Результаты комплексирования с ПСН

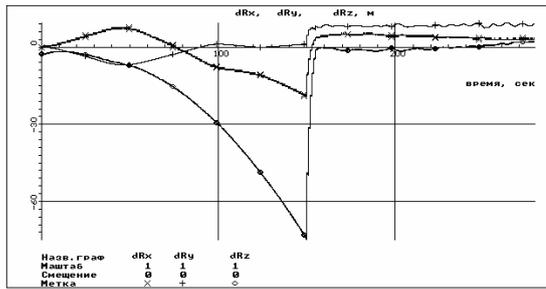
В таблице 1 приведены результаты статистического моделирования алгоритмов КНС с принятыми математическими моделями ДПИ, БИНС и ПСН. В таблице приведены математические ожидания (МО) и среднеквадратические отклонения (СКО) ошибок (880 реализаций) по координатам на момент включения алгоритма комплексирования с ПСН (примерно 150 секунд от начала движения) и максимальные ошибки КНС на траектории при коррекции от ПСН.

Типовые графики изменения ошибок КНС по проекциям координат, скорости и ориентации в процессе траекторного движения приведены на рисунке 2.

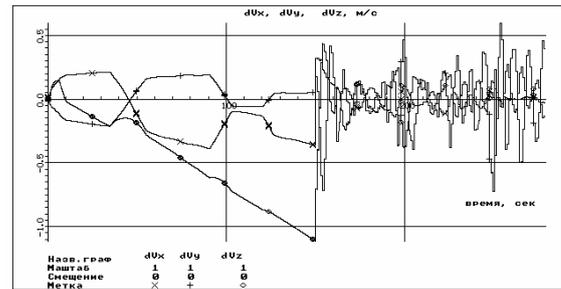
Таблица 1

Ошибки КНС (комплексирование с ПСН)

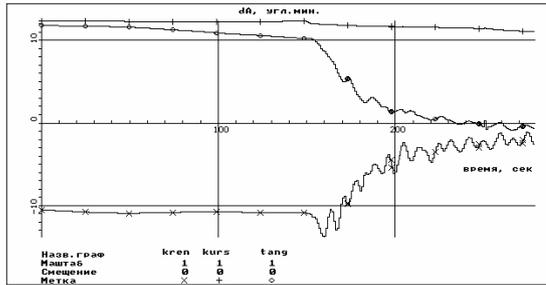
Ошибки на момент включения АКС						Максимальные ошибки по траектории					
$\Delta R_x$ , м		$\Delta R_y$ , м		$\Delta R_z$ , м		$\Delta R_x$ , м		$\Delta R_y$ , м		$\Delta R_z$ , м	
МО	СКО	МО	СКО	МО	СКО	МО	СКО	МО	СКО	МО	СКО
-2,7	165,5	3,8	40,3	-8,0	295,3	-1,3	10,1	-3,4	12,1	-0,4	13,2



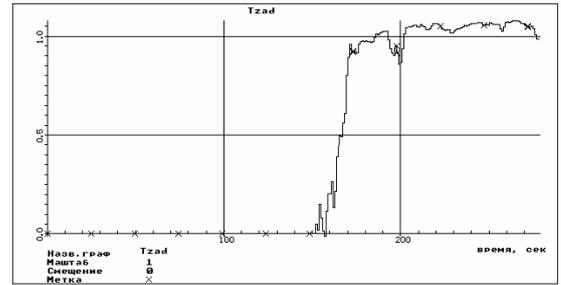
А)



Б)



В)



Г)

Рисунок 2 – Характеристики алгоритма комплексирования с ПСН

- А) Ошибки по координатам местоположения; Б) Ошибки по проекциям скорости;  
 В) ошибки по ориентации; Г) Оценка интервала времени запаздывания

С учетом принятой математической модели погрешностей информации ПСН, СКО погрешностей КНС по местоположению не превышает 15 м по каждой проекции координат, что в несколько раз перекрывает требования по допустимой точности КНС при работе с ПСН.

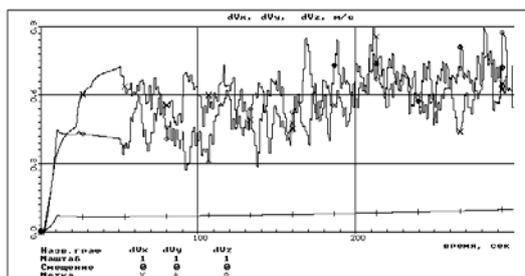
### Результаты комплексирования с РВиС

В таблице 2 приведены результаты статистического моделирования алгоритмов комплексирования с РВиС: математические ожидания и среднеквадратические отклонения ошибок (230 реализаций) по координатам на момент приведения в заданную точку и максимальные ошибки КНС по скорости при коррекции от РВиС.

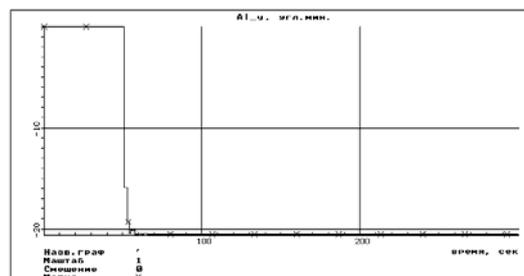
Типовые графики изменения ошибок КНС приведены на рисунке 3.

## Ошибки КНС (комплексирование с РВиС)

Ошибки на конечный момент движения						Максимальные ошибки по скорости					
$\Delta R_x$ , м		$\Delta R_y$ , м		$\Delta R_z$ , м		$\Delta V_x$ , м/с		$\Delta V_y$ , м/с		$\Delta V_z$ , м/с	
МО	СКО	МО	СКО	МО	СКО	МО	СКО	МО	СКО	МО	СКО
6,8	301,0	-0,5	103,0	171,0	103,0	0,02	1,3	0,01	0,4	1,0	0,17



А)



Б)

Рисунок 3 – Характеристики алгоритма комплексирования с РВиС

А) ошибки по проекциям скорости; Б) Оценка угла рассогласования осей

На момент появления информации РВиС ошибки КНС по скорости стабилизируются, нарастание ошибок по координатам происходит линейно. СКО максимальных ошибок по скорости не превышает 1,5 м/с, что удовлетворяет требованиям по точности.

### Заключение

В обеспечение работ по созданию, испытанию и исследованию алгоритмов комплексной навигационной системы БПЛА получены следующие результаты:

1. Разработаны и исследованы математические модели подсистем КНС: инерциальных датчиков первичной информации, БИНС, ПСН и РВиС.
2. Разработаны общие алгоритмы и логика взаимодействия алгоритмов внутри функционального программного обеспечения КНС.
3. Разработаны математические алгоритмы комплексирования БИНС с ПСН и РВиС.
4. Разработан цифровой комплекс математический ЦКМ, включающий модели подсистем и позволяющий проводить отработку алгоритмов КНС и оценку точностных характеристик.

5. Проведено математическое моделирование алгоритмов КНС на ЦКМ с использованием реальных траекторий движения объекта БПЛА. Результаты математического моделирования подтверждают выполнение требований по точности, предъявляемых к КНС.

### **Библиографический список**

[1] Бабич О.А., Обработка информации в навигационных комплексах, Машиностроение, М., 1991 – 512 с.

[2] Андреев В.Д., Теория инерциальной навигации. Автономные системы, Наука, М., 1966 – 579 с.

[3] Кузовков Н.Т., Салычев О.С., Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация, Машиностроение, М., 1982 – 216 с.

[4] Степанов О.А., Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации, Часть 1, ГНЦ РФ ЦНИИ Электроприбор, СПб., 2009 – 496 с.

[5] Мишин А.Ю., Алгоритмы комплексной инерциально-спутниковой навигационной системы для подвижных объектов с малым временем работы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Н.Новгород, 2002, 143 с.

### **Сведения об авторах**

Мишин Андрей Юрьевич, ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА», начальник сектора, кандидат технических наук, 607220, Нижегородская область, г. Арзамас, ул. Кирова, 26, раб.т. +7(81347)78383, моб.т. +79036066711, andrew\_mishin@mail.ru.

Фролова Оксана Александровна, ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА», инженер-математик 2 категории, 607220, Нижегородская область, г. Арзамас, ул. Кирова, 26, раб.т. +7(81347)78383, моб.т. +79092952834, kseniy\_frolova@mail.ru.

Исаев Юрий Константинович, ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА», начальник сектора, 607220, Нижегородская область, г. Арзамас, ул. Кирова, 26, раб.т. +7(81347)78322, isaev\_yura@mail.ru.

Егоров Антон Владимирович, ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА», начальник сектора, 607220, Нижегородская область, г. Арзамас, ул. Кирова, 26, раб.т. +7(81347)78367, jumper@yandex.ru.