

УДК 656.7.052.002.5: 681.32(045)

В. М. Синеглазов, д-р техн. наук, проф.,
Ш. И. Аскеров

ОПТИМАЛЬНЫЙ ВЫБОР КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Институт аэрокосмических систем управления НАУ, e-mail: svm@nau.edu.ua

Рассмотрена задача оптимального выбора комплекса технических средств навигационных систем беспилотных летательных аппаратов. Представлен алгоритм решения поставленной задачи.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, бортовая инерциальная навигационная система, система воздушных сигналов, пирометрическая система ориентации, спутниковая система навигации, комплексированная навигационная система.

Введение. Обеспечение полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА) из одной точки пространства в другую по траекториям, обусловленным характером задачи, временем ее выполнения и условиями окружающей обстановки, осуществляется навигационно-вычислительными системами.

Основными режимами навигации являются:

- взлет и посадка с поверхности земли;
- выход на исходный (конечный) пункт маршрута и заданную линию пути;
- маршрутный полет (на большой и малой высотах).

Одной из центральных идей развития навигационного оборудования БПЛА является функциональное, информационное и аппаратурное объединение навигационных измерителей в интегрированный навигационный комплекс (ИНК), основными концептуальными особенностями архитектуры которого следует считать:

- реализуемость, открытость и адаптируемость архитектуры и масштабируемость вычислительных средств;
- общность используемых на борту различных БПЛА аппаратных и программных средств;
- независимость программ от используемых аппаратных платформ;
- приемлемая стоимость элементной базы ИНК;
- ориентация на широкое использование коммерческих технологий и компонентов;
- унифицированность сети передачи данных;
- стандартизация конструкции;
- высокие уровни надежности, ремонтпригодности, технического обслуживания, эффективные средства и изоляции ошибок.

Описательная модель комплекса технических средств навигационной системы БПЛА. Для решения задач навигации и ориентации определяющим является измерение состояния системы. Наиболее полно эта функция реализуется с помощью комплексированной навигационной системы, состоящей из бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), комплексированной аэромагнитометрической (датчики абсолютного и дифференциального давления, трехосный магнитометр), пирометрической навигационной системой (АМПНС) и спутниковой навигационной системой (СНС) ГЛОНАСС/GPS.

Структурная схема глубоко интегрированной навигационной системы БПЛА приведена на рис. 1.

В предложенной навигационной системе на основе оценки полученной информации выбирается наилучшее условие, полученное любой из систем (СНС, БИНС, АМПНС), в зависимости от характера движения.

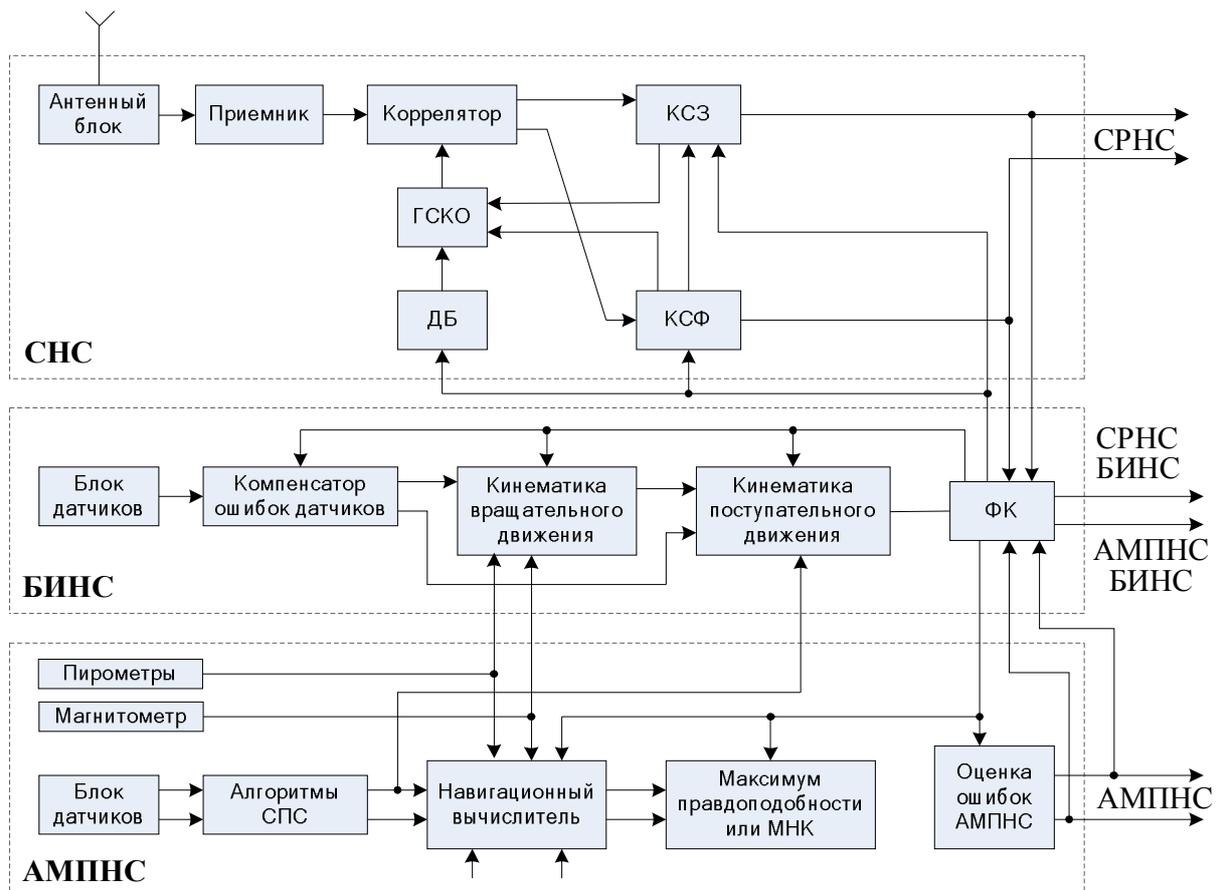


Рис. 1. Структурная схема навигационной системы БПЛА: КСЗ – контур слежения за задержкой; ГСКО – генератор синфазных и квадратурных откликов; КСФ – контур слежения за фазой; ДБ – добавочный блок; ФК – фильтр Калмана; СРНС – спутниковая радионавигационная система; СПС – система воздушных сигналов

Чувствительными элементами БИНС являются гироскопы – датчики абсолютных угловых скоростей вращения. Единственным источником информации для БИНС являются скорости вращения летательного аппарата (ЛА) относительно связанной системы координат. Главным источником погрешности при определении углов ориентации являются собственные уходы (дрейфы) гироскопов. Для первоначальной ориентации (выставки) БИНС относительно опорной системы координат применяются акселерометры [1].

Датчиками БИНС являются гироскопические датчики угловых скоростей (ДУС) вращения ЛА, с помощью которых определяется угловое отклонение ЛА относительно опорной системы координат.

Микромеханические гироскопы обладают большим дрейфом, поэтому требуется коррекция алгоритма вычисления угловых параметров. Коррекцию алгоритма ориентации можно осуществлять в моменты времени, когда БПЛА летит прямолинейно и равномерно.

В качестве ДУС для БИНС БПЛА можно применять кориолисовые вибрационные гироскопы (КВГ), волновые твердотельные гироскопы (ВТГ) с кольцевым резонатором, а также роторные вибрационные, волоконно-оптические и твердотельные гироскопы, если они подходят по массогабаритным параметрам.

Микромеханические акселерометры (ММА) по массогабаритным параметрам и энергопотреблению наиболее подходят для малоразмерных БПЛА [2].

Технические характеристики КВГ приведены в табл. 1.

Микромеханические акселерометры по массогабаритным параметрам и энергопотреблению наиболее подходят для малоразмерных БПЛА [2].

Таблиця 1

Характеристики КВГ серии ENV и FNC фирмы Murata

Характеристика	Условия	ENV-05D-02	ENC-05S
Стандартные диапазоны, град/с	—	± 80	± 90
Частотный диапазон, Гц	—	—	0 ... 50
Выходной сигнал, В	Нулевая входная угловая скорость	+ (2,2 ... 3 8)	—
Напряжение питания, В	—	+ (4,5 ... 5,5)	+ 5,0 ± 0,1 %
Потребляемый максимальный ток, мА	$U = 5,0 \text{ В}$	15	10
Крутизна характеристики, мВ/град/с	$\frac{(-10 \dots +60)}{(-30 \dots +80)} \text{ } ^\circ\text{N}$	20 ... 24 19 ... 25	0,8 ± 20 %
Дрейф нуля, град/с	$(-30 \dots +80) \text{ } ^\circ\text{N}$	9,0	—
Линейность в % от диапазона	Максимальная угловая скорость; температура $(-20 \dots 25) \text{ } ^\circ\text{N}$	+ 0,5	Менее 5,0
Уровень шума, мВ	Шум 7кГц	20,0	—
Максимальная масса, г; размеры, мм	—	50; 18×30×41	3,5; 20×13×7

Микромеханические акселерометры имеют чувствительный элемент, включающий инерционную массу на упругом подвесе, преобразователь ее перемещений и обслуживающую (сервисную) электронику, выполненные на одном чипе (кристалле) технологиями микроэлектромеханических систем (МЭМС). Разработкой и серийным производством ММА занимаются фирмы Analog Devices, Motorola, Hitachi, Hilton Head и др. Наиболее широким спектром моделей и характеристик обладают ММА серии ADXL фирмы Analog Devices (табл. 2). Акселерометры этой серии являются осевыми и выпускаются в вариантах прямого и компенсационного преобразований.

Таблиця 2

Характеристики ММА серии ADXL

Марка ММА/ количество осей чувствительности	Характеристика, размерность					
	Диапазон измерений, м/с ²	Крутизна статической характеристики, мВ/м/с ²	Нелинейность характеристики, %	Плотность шума, мВ	Напряжение питания, В / потребляемый ток, мА	Вид сигнала, напряжение или ШИМ
ADXL202/2	±2	12,5 %/g	0,2	0,5	3 ÷ 5 / 0.6	ШИМ
ABKL05/1	±5	—	0,2	0,5		Напряжение
ADXL105/1	±5	250	0,2	0,175	2,7 ÷ 5,2/2	Напряжение
ADXL210/2	±10	—	0,2	0,5		ШИМ
ADXL150/1	±50	38	0,2	1,0	5/2	Напряжение
ADXL250/2	±50	38	0,2	1,0	5/3,5	Напряжение
ADXL190/1	±100	18	0,2		5/2	Напряжение

Примечание: ШИМ – широтно-импульсная модуляция.

Микромеханические акселерометры ADXL150 и ADXL 250 относятся к приборам третьего поколения и обладают абсолютной погрешностью 0,01 g. По сравнению с другими моделями у них уменьшенный дрейф нуля, не превышающий 0,4 g в диапазоне температур (минус 50 ... +100)°C. Акселерометры выдерживают ускорение 2000 g длительностью 0,5 мс без питания и ускорение 500 g длительностью 0,5 мс с питанием.

В аэромагнитометрической и пирометрической системе навигации в качестве чувствительных элементов используют датчики абсолютного и дифференциального давления, трехосевой магнитометр, пирометрические датчики.

В общем случае датчик давления, выполненный по технологиям МЭМС, можно использовать как микромеханический датчик давления (ММДД).

Наиболее распространены ММДД фирмы Honeywell и Motorola. В табл. 3 приведены параметры ММДД фирмы Honeywell, которые могут работать в диапазоне температур минус 40 ... +85 °C (ресурсы сети Интернет).

Таблица 3

Основные параметры датчиков давления фирмы Honeywell

Наименование	Максимальное рабочее давление, кПа	Максимальное допустимое давление, кПа	Напряжение питания, В	Выходное напряжение, мВ	Чувствительность, мВ/кПа	Компенсация, калибровка	Линейность, % от выходного напряжения
24FCE	3,5	138	10,0	± 35	± 10	Нет	0,25
24PCA/26PCA	6,9			± 45	± 6,5		
24PCB/26PCB	34			± 115	± 3,3		
24PCC/26PCC	103	310		± 225	± 2,2	Нет/да	
24PCD/26PCD	207	410		± 330	± 16		
24PCF/26PCF	690	1380		± 225	± 0,33		
24PCG	1720	3450		± 212	± 0,12	Нет	

Для авионики БПЛА предпочтительным являются магнитометры магниторезистивного типа (датчики).

Трехосевые магнитометрические датчики позволяют определять угловую ориентацию БПЛА в пространстве.

Наиболее широко представлены магниторезисторы фирмы Honeywell (табл. 4) (ресурсы сети Интернет).

Технические характеристики пирометров приведены в табл. 5.

Постановка задачи. Проблема выбора комплекса технических средств навигационной системы для БПЛА заключается в решении многокритериальной задачи. Постановку многокритериальной задачи можно сформулировать в следующем виде. Из множества J , сравниваемых образцов авионики ($j_k = \overline{1; J}$) заданного k -го класса перечнем X сравниваемых характеристик (показателей) ($x = \overline{1; X}$), которые описываются интегральными показателями качества (ИПК), необходимо выбрать по критериям их эффективности и стоимости оптимальный образец авионики, с максимальным уровнем ИПК и с минимальным уровнем стоимостных затрат.

Сформируем критерии выбора комплектующих элементов навигационной системы БПЛА (точность, масса, габариты, стоимость, надежность, затраты на обслуживание).

Таблица 4

Магниторезисторы

Наименование	Диапазон рабочих значений магнитного потока, Гс	Сопротивление моста, Ом	Количество мостов в схеме	Чувствительность, мВ/В/Г	Напряжение питания, В	Максимальная рабочая частота, МГц	Диапазон рабочих температур T, °C
HMC 1001	± 2	850	1	3	5	5	-55...100
HMC 1002			2				
HMC 1021S/Z/D	± 6	1100	1	1	3	5	-40...125
HMC 1022			2				
HMC 1052		1000	1		5		
HMC 1051Z			3				
HMC 1023	1100	3	5				
HMC 2003	± 2	1100	3	1000	10	0,001	
HMC 1501	0 ... 80	5000	1	2,1	5	± 45	-40...125
HMC 1512		2100	2			± 90	

Таблица 5

Технические характеристики пирометров

Модель	Выходной сигнал	Диапазон, мкм	Угол обзора, град	Масса, г	Напряжение питания, В	Производитель
MLX90614	Цифровой	5,5 ... 15	± 88	4	2,6 ... 7	Melexis
MLX90615	Цифровой	5,5 ... 15	± 88	2	2,6 ... 7	Melexis
MLX90247	Аналоговый	5,5 ... 15	± 88	4	2,6 ... 7	Melexis
TPS333	Аналоговый	5,5 ... 12	± 80	2	1,2 ... 12	PerkinEimer
TP297A	Аналоговый	7 ... 14	± 45	4	1,2 ... 12	Roithner Lasertechnik
TP336	Аналоговый	5 ... 15	± 45	4	1,2 ... 12	Roithner Lasertechnik
TP337	Аналоговый	5 ... 15	± 45	4	1,2 ... 12	Roithner Lasertechnik
TP338x	Аналоговый	5 ... 15	± 50	4	1,2 ... 12	Roithner Lasertechnik
TP339x	Аналоговый	5 ... 15	± 45	4	1,2 ... 12	Roithner Lasertechnik

Алгоритм решения поставленной задачи. В качестве алгоритма решения поставленной задачи предлагается использовать метод анализа иерархий [1].

Алгоритм выбора наилучшего варианта из четырех сравниваемых гипотетических образцов навигационной системы БПЛА показан на рис. 2.

Этап 1. В качестве интегральных показателей качества принимаем техническое совершенство и экономичность интегрированной навигационной системы, а в качестве конечного показателя их свертку с весовыми коэффициентами.



Рис. 2. Структурная схема связей показателей при выборе комплектующих ИНС

Этап 2. Определение степеней влияния показателей на ИПК формируется на основе девятибалльной шкалы сравнений альтернатив по результатам оценки экспертов (табл. 6).

Таблица 6

Шкала сравнения альтернатив

Относительная важность	Определение степеней влияния
1	Равная важность показателей
3	Небольшое преимущество одного над другим
5	Большое преимущество
7	Значительное преимущество
9	Абсолютное преимущество
2, 4, 6, 8	Промежуточные суждения

Один и тот же единичный показатель может оказывать различное влияние на каждый ИПК. Сравнения проводятся следующим образом: если П2 значительно преобладает над П4, то элементу табл. 7 с номером (2, 4) присваивается значение 7, а при сравнении П4 с П2, элементу табл. 7 с номером (4, 2) присваивается обратное значение. Результаты попарного сравнения показателей на основе рассмотренной шкалы приведены в табл. 7 и 8.

Таблица 7

Матрица попарных сравнений показателей относительно ИПК «техническое совершенство»

Показатель	П1	П2	П3	П4
П1	1	3	4	6
П2	1/3	1	5	7
П3	1/4	1/5	1	3
П4	1/6	1/7	1/3	1

Таблица 8

**Матрица попарных сравнений показателей
относительно ИПК «экономичность»**

Показатель	П4	П5	П6
П4	1	1/5	3
П5	5	1	7
П6	1/2	1/7	1

Проводим попарные сравнения оценочных показателей ИНС и получаем 6 матриц 4×4 отдельно по каждому показателю. Из группы матриц парных сравнений формируется набор локальных приоритетов, которые выражают относительное влияние множества элементов на элемент верхнего уровня, а затем определяется вектор приоритетов на основе метода среднего геометрического. Векторы приоритетов приведены в табл. 9, 10.

Таблица 9

Векторы приоритетов для интегрального показателя «техническое совершенство»

Показатель		П1	П2	П3	П4
Вектор приоритета		0,29	0,55	0,11	0,05
Приоритеты ИНС по каждому показателю	ИНС1	0,23	0,25	0,21	0,25
	ИНС2	0,25	0,15	0,33	0,20
	ИНС3	0,26	0,31	0,24	0,26
	ИНС4	0,27	0,29	0,21	0,29

Таблица 10

Векторы приоритетов для интегрального показателя «экономичность»

Показатель		П4	П5	П6
Вектор приоритета		0,19	0,73	0,08
Приоритеты ИНС по каждому показателю	ИНС1	0,25	0,225	0,20
	ИНС2	0,20	0,20	0,24
	ИНС3	0,26	0,32	0,26
	ИНС4	0,29	0,23	0,31

Этап 3. Глобальный приоритет для ИПК находится как сумма произведений локальных приоритетов на приоритет соответствующего показателя (табл. 11).

Таблица 11

Глобальные приоритеты

Интегральная навигационная система	Глобальный приоритет для интегрального показателя «техническое совершенство»	Глобальный приоритет для интегрального показателя «экономичность»
ИНС1	0,251	0,249
ИНС2	0,203	0,205
ИНС3	0,283	0,301
ИНС4	0,273	0,245

Для достижения конечной цели необходимо определить, как влияют интегральные показатели на конечный результат. Предположим, что интегральные показатели равноценны и коэффициенты влияния равны 0,5. Значения приоритетов оптического устройства наблюдения будут исчисляться как сумма произведения коэффициента влияния и соответствующего глобального приоритета. Отсюда получим следующее значение вектора приоритета для сравниваемых устройств наблюдения БПЛА:

$$\text{ИНС1} = 0,250; \text{ИНС2} = 0,204; \text{ИНС3} = 0,292; \text{ИНС4} = 0,259.$$

Из анализа приведённых результатов следует, что ИНС 3 является лучшим образцом из сравниваемых вариантов, который и рекомендуется выбрать.

Выводы. В работе решена задача оптимального выбора устройства наблюдения для БПЛА на основании решения задачи многокритериальной оптимизации. Для решения задачи многокритериальной оптимизации был использован метод анализа иерархий. Использование предложенного подхода позволит повысить эффективность, сократить время проектирования комплекса технических средств ИНС для БПЛА и повысить эффективность их использования.

Использование предложенного подхода решения многокритериальной задачи оптимизации позволяет спроектировать ИНК БПЛА оптимальным образом.

Список литературы

1. *Беспилотные летательные аппараты: Методики приближенных расчетов основных параметров и характеристик* / В. М. Ильюшко, М. М. Митрахович, А. В. Самков и др. под общ. ред. В. И. Силкова – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, – 2009 – 302 с.
2. *Распопов В. Я. Микросистемная авионика: учеб. пособие* / В. Я. Распопов. Тула: «Гриф и К», – 2010. – 248 с.

В. М. Синеглазов, Ш. І. Аскеров

Оптимальный вибір комплексу технічних засобів навігаційних систем безпілотних літальних апаратів

Розглянуто завдання оптимального вибору комплексу технічних засобів навігаційних систем безпілотних літальних апаратів. Подано алгоритм вирішення поставленого завдання.

V. M. Syineglazov, Sh. I. Askerov

Optimal choice of navigation systems hard ware for unmanned aerial vehicles

In given article the problem of an optimal choice of navigation systems hard ware for unmanned aerial vehicles is considered, its complexation and physical integration. Presented a method to solve the problem.