

В. М. А ч и л ь д и е в, Ю. К. Г р у з е в и ч,
В. А. С о л д а т е н к о в, С. С. Р я з а н о в

МИКРОМИНИАТЮРНЫЕ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ И ГИРОСКОПОВ ДЛЯ НАШЛЕМНЫХ СИСТЕМ ЦЕЛЕУКАЗАНИЙ И ИНДИКАЦИИ

Дана оценка современного уровня российских и зарубежных разработок наشلемных систем целеуказания и индикации, а также систем позиционирования на основе микрогироскопов и микроакселерометров. Разработан и изготовлен образец, и приведены результаты экспериментальных исследований.

Для реализации пилотами самолетов и вертолетов важнейших функций, число которых непрерывно возрастает, необходимо применять новые физические принципы и ключевые наукоемкие и информационные технологии. Без использования таких технологий управлять сложнейшими современными самолетами и вертолетами было бы невозможно, так как органы чувств пилота посылали бы в мозг огромное количество информации и он “утонул” бы в их потоке, если бы не воспринимал нужную информацию. Наиболее перспективным решением проблемы распределения выполняемых функций между пилотом и бортовыми системами современных авиационных комплексов является создание принципиально новых высокоинформативных высокоточных интегрированных наشلемных систем целеуказания и индикации, или отображения информации (НСЦИ), основанных на новых физических принципах и наукоемких технологиях.

При создании авиационных НСЦИ необходимо учитывать, что НСЦИ должна быть снабжена следующими системами:

— отображения с максимально высоким качеством телевизионных изображений наземных и воздушных целей, сформированных различными информационными бортовыми авиационными оптико-телевизионными каналами;

— формирования и вывода на высокоразрешающий высокояркостный дисплей символьной информации на фоне закабинного пространства (с выделением цветом сетки рельефа и опасных препятствий), а также на фоне телевизионных изображений;

— определения угловых координат линии визирования и линейных координат положения защитного шлема (в связанной системе координат);

— обеспечения поиска, обнаружения, распознавания, захвата и сопровождения воздушных целей за счет поворота головы пилота и смещения прицельной марки с выбранной воздушной целью и др.

Поэтому НСЦИ представляет собой достаточно сложный и громоздкий оптико-электронный комплекс, решающий большое число задач и состоящий из размещенных на защитном пилотажном шлеме систем индикации и позиционирования, а также аппаратуры, размещенной непосредственно на борту самолета или вертолета.

При создании НСЦИ основные проблемы были связаны с проектированием нашлемных систем индикации и позиционирования, так как первоначально пилотажный защитный шлем разрабатывался для защиты пилота при попадании в аварию или при катапультировании. Затем защитные шлемы стали использоваться для закрепления на них необходимых устройств жизнеобеспечения пилотов и пилотирования самолетов: системы для защиты глаз от лазерного излучения, пилотажных очков ночного видения, системы связи, кислородных масок, системы активного понижения шумов и др. В результате эти устройства перегрузили защитный шлем, что привело к усталости пилотов и, как следствие, к снижению эффективности их внимания при длительной эксплуатации вертолетов или самолетов. Во многих случаях, располагая на шлеме различные устройства, думали только о достижении поставленных целей, игнорируя условия эксплуатации или эргономические требования, предъявляемые к защитным шлемам. Поэтому при обосновании требований к нашлемной части НСЦИ и при ее проектировании необходимо учитывать эти обстоятельства.

Проводимые за рубежом разработки НСЦИ завершились созданием интегрированных авиационных систем с нашлемными системами индикации бинокулярного и монокулярного типов (рис. 1) [1] и нашлемными системами позиционирования оптического, оптико-телевизионного, электромагнитного, магнитного типов и др.

Отличительная особенность разработанных нашлемных систем позиционирования — это наличие передающей системы, расположенной на борту летательного аппарата, и приемной части, закрепленной на защитном шлеме пилота, что увеличивает и без того большую массу и габаритные размеры пилотажного защитного шлема с нашлемной системой индикации.

В настоящее время в МГТУ им. Н.Э. Баумана и НПО “Геофизика-НВ” ведутся интенсивные разработки систем позиционирования, основанных на платформенных инерциальных блоках (БИБ), выполненных на базе микромеханических акселерометров (ММА) и гироскопов. При этом, как видно из технической характеристики, системы позиционирования имеют единый типоразмер и одинаковые массогабаритные характеристики. Система позиционирования, основанная на двух ММА, предназначена для измерения углов наклона изделий, поверхностей и рельефа местности относительно горизонта.

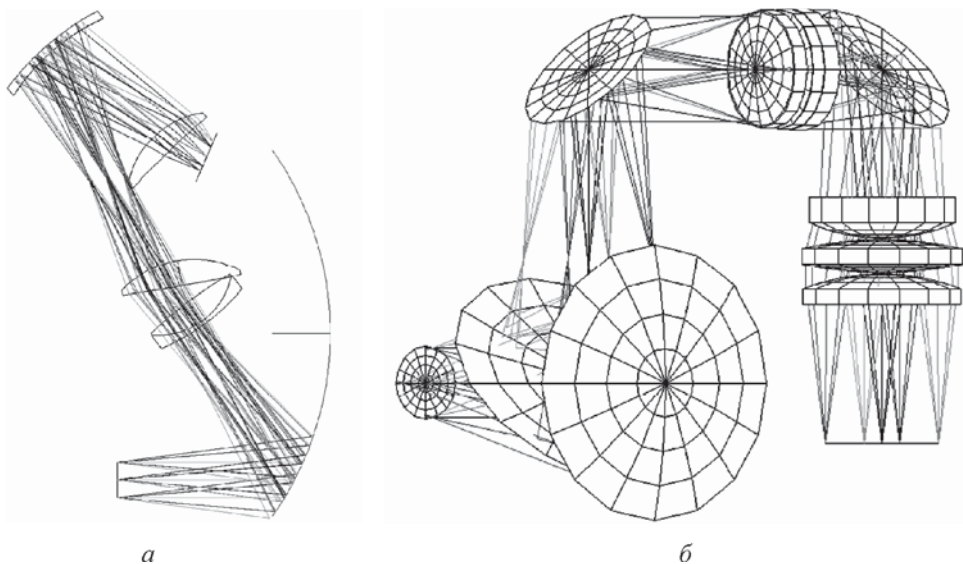


Рис. 1.Mono- (а) и бинокулярная (б) оптические системы НСЦИ

Проектные технические характеристики БИБ для НСЦИ

	УФСП-2	УФСП-3
Объем, см ³	45	45
Габаритные размеры, мм.....	∅48 × 25	∅48 × 25
Масса, г.....	100	100
Ударная перегрузка, g.....	2000	2000
Диапазон измерения ускорений, g.....	1, 2, 5	10
Число измерительных осей, шт.....	2	3
Погрешность смещения нуля, g.....	0,001	0,001
Спектральная плотность шума, $mg/\sqrt{\Gamma\text{ц}}$	0,5	0,2
Погрешность МК, %.....	0,5	0,2
Нелинейность МК, %.....	0,5	0,2
Несимметрия МК, %.....	Нет данных	Нет данных
Полоса частот, Гц.....	20	50
Неортогональность ОЧ, градус.....	0,1	0,25
Случайное блуждание скорости, $\text{м/с/ч}^{\frac{1}{2}}$	2	2
Диапазон измерения угловой скорости, град/с..	Нет данных	300
Погрешность смещения нуля гироскопов, град/ч	—»—	54
Погрешность МК гироскопов в запуске, %.....	—»—	0,1
Случайное блуждание угла, $\text{град/ч}^{\frac{1}{2}}$	—»—	4,2
Полоса частот, Гц.....	10	50

Система позиционирования, основанная на трех микромеханических гироскопах и трех ММА, предназначена для НСЦИ. Системы позиционирования с двумя ММА являются измерителями проекции

ускорения свободного падения с индикацией полученного сигнала в цифровом виде [2].

Схема построения систем позиционирования на основе двух ММА приведена на рис. 2. Система содержит две платы: блок интерфейса (сопряжения) 1 и модуль позиционирования 4, установленные в корпусе 5, выполненном из сплава алюминия. Плата модуля позиционирования 4 установлена на компенсаторах температурных деформаций 2 внутри корпуса 5 и закреплена с помощью винтов 3. На внешней поверхности платы сопряжения 4 установлен электрический разъем 7. Корпус 5 закрыт крышкой 8 с резиновой прокладкой 6. Системы позиционирования УФСП-2 и УФСП-3 отличаются модулями позиционирования 4.

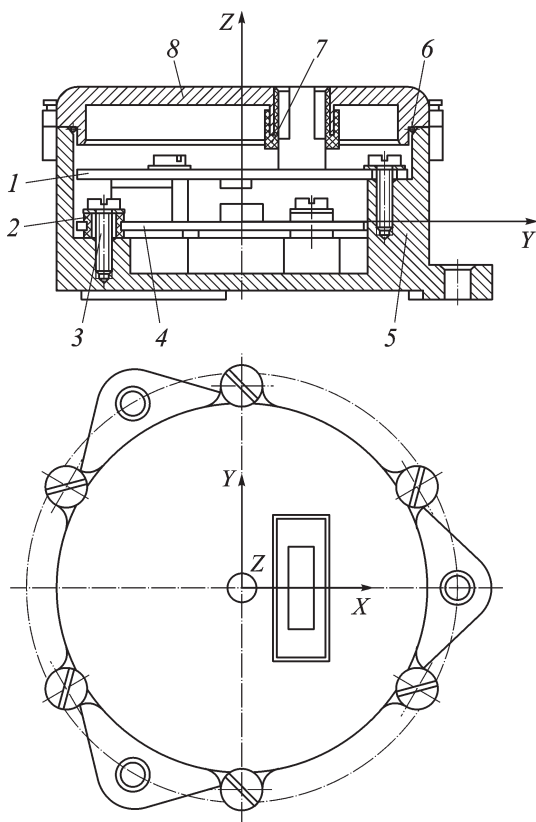


Рис. 2. Унифицированная система позиционирования

Системы позиционирования в зависимости от назначения имеют разные диапазоны измерения параметров. Для каждого диапазона углов, линейных ускорений и угловых скоростей измерители изготавливаются отдельно. Чтобы обеспечить унификацию измерителей и повысить точность измерений углов в диапазоне, менее 90° , вводят поправку. В состав платы модуля позиционирования 4 (см. рис. 2) входят (рис. 3) последовательно соединенные двухкоординатный измеритель ускорения 1, выполненный на основе ММА, блок операционных усилителей 2, микроконтроллер (МК) 3, блок интерфейса 4. Блок 2 состоит из операционных усилителей, в обратную связь которых включены электронные потенциометры.

Первый выход (U_{ax}) двухкоординатного измерителя ускорения 1 соединен с первым входом блока операционных усилителей 2. Второй выход (U_{ay}) двухкоординатного измерителя ускорения соединен со вторым входом блока операционных усилителей, первый выход (U_α) которого соединен с первым входом микроконтроллера 3, а его

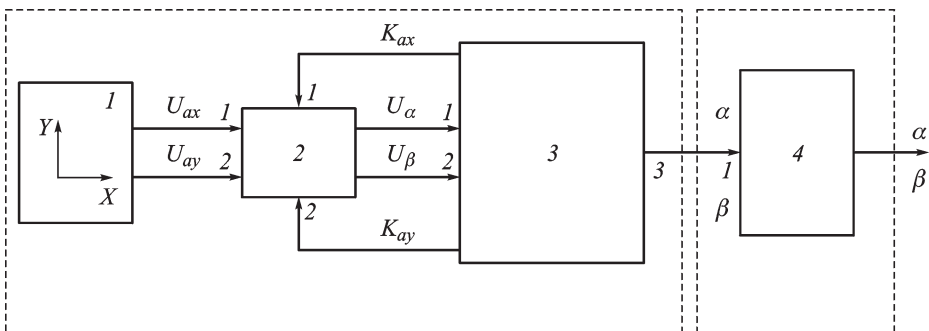


Рис. 3. Блок-схема системы позиционирования с двумя ММА

первый выход МК 3 (K_{ax}) соединен с первым входом блока операционных усилителей 2. Причем первым входом блока операционных усилителей 2 является вход блока электронных потенциометров. Второй выход (U_{β}) блока операционных усилителей 2 соединен со вторым входом микроконтроллера 3, второй выход (K_{ay}) которого соединен со вторым входом блока операционных усилителей. Третий выход микроконтроллера 3 соединен с входом-выходом блока интерфейса 4.

Система позиционирования работает следующим образом. Сигналы U_{ax} и U_{ay} с выхода ММА поступают на соответствующие входы блока операционных усилителей, где усиливаются и на выходе вычисляются по формулам:

$$U_{\alpha} = K_d U_{ax};$$

$$U_{\beta} = K_d U_{ay},$$

где $K_d = \frac{90}{D}$ и $0 < D \leq 90$.

С выходов блока операционных усилителей сигналы U_{α} и U_{β} поступают на входы микроконтроллера 3, где по приведенным формулам определяются углы α и β . Величина K_d определяется значением сигнала, поступающего с микроконтроллера на электронные потенциометры блока операционных усилителей 2.

Способ измерения углов позиционирования заключается в следующем. Двухкоординатный измеритель 1 ускорения свободного падения выдает напряжения U_{ax} , U_{ay} , пропорциональные проекции ускорения на соответствующую ось, которая, в свою очередь, зависит от положения корпуса измерителя и определяется углами наклона α, β к горизонту по соотношениям:

$$U_{ax} = K_{ax} g \sin \alpha;$$

$$U_{ay} = K_{ay} g \sin \beta,$$

где g — ускорение свободного падения, м/с^2 ; U_{ax}, U_{ay} — напряжения, снимаемые с ММА по соответствующим осям, В; K_{ax}, K_{ay} — масштабные коэффициенты ММА, $\text{В} \cdot \text{с}^2/\text{м}$.

Таким образом, выходное напряжение с измерителя определяется значением измеряемого угла наклона (α, β).

Измеряемые углы вычисляются по следующим выражениям:

$$\alpha = \arcsin \frac{U_{ax}}{K_d g};$$

$$\beta = \arcsin \frac{U_{ay}}{K_d g}.$$

Для этого в микропроцессоре выполняются следующие математические операции:

$$\alpha = \arcsin \frac{U_\alpha}{K_d K_{ax} g}; \quad \beta = \arcsin \frac{U_\beta}{K_d K_{ay} g}.$$

Для повышения точности определения углов, лежащих в пределах от 45° до 90° , используются следующие выражения:

$$\sin \alpha = \frac{U_\alpha}{K_d K_{ax} g}; \quad \sin \beta = \frac{U_\beta}{K_d K_{ay} g};$$

$$\alpha = \arccos \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}; \quad \beta = \arccos \sqrt{1 - \sin^2 \beta}.$$

Расчет проводили, вычисляя функции $\arcsin(\dots)$ разложением их в ряд. В расчетах значений ряда учитывался 21 член включительно. Значения углов наклона в диапазоне менее $\pm 45^\circ$ вычисляли по $\sin(\dots)$, более $\pm 45^\circ$ — по $\cos(\dots)$. Результаты расчета погрешности определения углов системы позиционирования в диапазоне от 0 до 90° приведены на рис. 4.

При использовании двухкоординатного измерителя прибор имеет два выхода; напряжения на этих выходах изменяются независимо друг от друга, но зависят от наклона измерителя относительно одной или другой оси или одновременно относительно обеих. При этом способе измерения линейного ускорения достаточно двух измерителей вместо



Рис. 4. Расчет погрешности определения углов системы позиционирования

трех. Такой способ измерения непосредственно в системе позиционирования реализуется путем установки в цепь обратной связи операционных усилителей электронных потенциометров, обеспечивающих коэффициент обратной связи (от 1 до 9) в зависимости от диапазона измеряемых углов. Данная схема включения позволяет изменять коэффициент обратной связи операционного усилителя по команде микропроцессора в зависимости от диапазона углов, на который рассчитано изготовляемое устройство. Эта операция осуществляется в процессе изготовления или перепрограммирования устройства.

Система позиционирования работает одинаково при определении значений углов относительно той или другой оси.

Одним из недостатков микромеханических датчиков является зависимость их показаний от температуры. Как показали испытания, показания системы позиционирования могут быть скорректированы с использованием зависимости [3]

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1(t - t_0),$$

где $\alpha(t)$ — показания УФСП; α_0, α_1 — коэффициенты, характеризующие зависимость показания УФСП от температуры; t_0 — номинальная температура.

Коэффициенты для каждой УФСП определяются по результатам испытаний в рабочем диапазоне температур и записываются с помощью микропроцессора. При использовании метода наименьших квадратов получаем

$$\alpha_0 = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n \alpha(t) \sum_{i=1}^n (t_i - t_0)^2 - \sum_{i=1}^n (t_i - t_0) \sum_{i=1}^n \alpha(t)(t_i - t_0)}{\sum_{i=1}^n (t_i - t_0)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (t_i - t_0) \right)^2};$$

$$\alpha_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - t_0)\alpha(t) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - t_0) \sum_{i=1}^n \alpha(t_i)}{\sum_{i=1}^n (t_i - t_0)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (t_i - t_0) \right)^2},$$

где $\alpha(t_i)$ — показание системы позиционирования при фиксированной температуре t_i ; n — число измерений в заданном диапазоне температур.

Погрешность аппроксимации $\delta\alpha$ при этом определяется из выражения

$$\delta\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\alpha(t_i) - (\alpha_0 + \alpha_1 t_i)]^2}{n}}.$$



Рис. 5. Система позиционирования УФСП-2

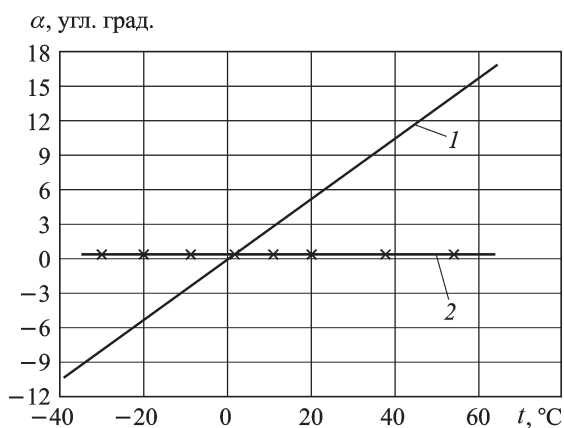


Рис. 6. Зависимость показаний системы позиционирования от температуры измерителя углов наклона относительно горизонта

Поправочный коэффициент α_1 записывается в ПЗУ для каждой системы. На основе этого коэффициента вводится поправка на показания системы позиционирования в широком диапазоне температур.

Проведенные испытания системы позиционирования УФСП-2 (рис. 5) в составе стенда АС1120V.2.3 при изменении температуры от -40°C до $+60^\circ\text{C}$ показали, что зависимость показаний системы позиционирования от температуры измерителя углов наклона относительно горизонта носит линейный характер (рис. 6).

Система позиционирования одинаково работает при измерении углов относительно той или другой оси.

Точность измерения углов с использованием данного цифрового измерителя определяется точностью датчика ускорения свободного падения (не более 0,1% от измеряемого угла) и аналого-цифрового преобразователя (цена младшего разряда не превышает $0,05^\circ$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Electro-optical imaging: system performance and modeling / L. Biberman, editor. – SPIE Press, 2000. – 645 p.
2. Ачильдиев В. М., Грузевич Ю. К., Рязанов С. С. и др. Способ определения уклонов и система позиционирования для его осуществления. Заявка на изобретение. Регистрационный № 2008114901 от 18.04.2008 г.
3. Ачильдиев В. М., Вязов С. М., Колодезный Э. А. и др. Системы управления средств выведения и их сертификация. – М.: МГУИ, 2004. – 175 с.

Статья поступила в редакцию 23.06.2008

Владимир Михайлович Ачильдиев родился в 1947 г., окончил в 1971 МГУИ. Канд. техн. наук, главный конструктор ОАО “НПО Геофизика-НВ”. Автор более 70 научных работ в области систем управления движением и навигации.

V.M. Achil'diev (b. 1947) graduated from the Moscow Institute for Forestry Engineering in 1971. Ph. D. (Eng.), chief designer of public joint-stock company “NPO Geofizika-NV”. Author of more than 70 publications in the field of systems of motion and navigation control.

Юрий Кириллович Грузевич родился в 1951 г., окончил в 1974 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана и в 1978 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана, заместитель генерального директора ОАО “НПО Геофизика-НВ”, лауреат Государственной премии Российской Федерации 2002 г. в области науки и техники. Автор более 150 научных работ в области оптической обработки и отображения информации, приборов ночного видения.

Yu.K. Gruzevich (b. 1951) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1974 and the Lomonosov Moscow State University in 1978. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Laser and Optical and Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University, deputy general director on scientific work of public joint-stock company “NPO Geofizika-NV”, Winner of the State Prize of the Russian Federation in Science and Technology (in 2002). Author of more than 150 publications in the field of data optical processing and display, devices of night viewing.

Виктор Акиндинович Солдатенков родился в 1943 г., окончил в 1970 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана, Генеральный директор ОАО “НПО Геофизика-НВ”, заслуженный машиностроитель РФ. Автор более 90 научных работ в области технологии оптико-электронного приборостроения и ночного видения.

V.A. Soldatenkov (b. 1943) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1970. D. Sc. (Eng.), professor of “Laser and Optical and Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University, general director on scientific work of public joint-stock company “NPO Geofizika-NV”, Honored Industrial Engineer of the Russian Federation. Author of more than 90 publications in the field of technology of optical and electronic instrument engineering, devices of night viewing.

Сергей Серафимович Рязанов родился в 1982 г., окончил в 2005 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Ведущий инженер-конструктор ОАО “НПО Геофизика-НВ”.

S.S. Ryazanov (b. 1982) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2005. Leading engineer-designer of public joint-stock company “NPO Geofizika-NV”.