

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ УСТРОЙСТВ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО СОЛНЕЧНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ И ИНФРАКРАСНОМУ ГОРИЗОНТУ ЗЕМЛИ

А. В. Мельников,  
Е. Н. Михайлов, А. Е. Рабовский

*Представлены результаты деятельности Оптического научно-производственного центра АО «Корпорация «ВНИИЭМ» в рамках создания космических аппаратов в сотрудничестве с российскими предприятиями и в международных проектах. Центр специализируется на создании оптико-электронных приборов ориентации космических аппаратов по инфракрасному горизонту Земли – построителей местной вертикали, и по Солнцу – солнечных датчиков. Проведен обзор существующих приборов ориентации производства АО «Корпорация «ВНИИЭМ», а также схемы разрабатываемых Оптическим научно-производственным центром устройств, описание принципов их работы. Приводится сравнительный анализ технических характеристик: вес, габариты, потребление и точность – функциональных возможностей приборов и определяются области их применения. Отмечены факторы, сдерживающие процесс разработок и внедрение разработанных устройств.*

**Ключевые слова:** оптическая система, системы ориентации и навигации, построитель местной вертикали, солнечный датчик.

### Введение

За свое полувековое существование коллектив Оптического научно-производственного центра (ОНПЦ) разработал более 20 различных типов приборов ориентации как по Земле, так и по Солнцу. Деятельность подразделения направлена на совершенствование целого комплекса характеристик приборов, что позволило к настоящему времени создать серию устройств ориентации, обладающих высокими показателями точности и надежности, а также небольшими массогабаритными параметрами, позволяющими применять их даже на малых космических аппаратах.

Помимо деятельности в рамках АО «Корпорация «ВНИИЭМ», ОНПЦ вел и ведет разработки в интересах таких российских предприятий космической отрасли, как АО «НПО Лавочкина», АО «НПП «Алмаз», АО «КБ «Арсенал», ПАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королева», АО «ГКНПЦ им. Хруничева» (станция «Мир», международная космическая станция (МКС) «Альфа», станция «Салют-7», модуль МКС «Звезда», модуль «Заря»), АО «ВПК «НПО Машиностроения», в том числе в международных проектах «Метеор-3/ТОМС», «Интеркосмос-Болгария-1300».

В настоящее время работы ведутся в двух направлениях – устройства ориентации по инфракрасному (ИК) горизонту Земли и устройства ориентации по Солнцу [1].

### 1. Инфракрасные приборы ориентации по Земле

Наша планета непрерывно наблюдаема с орбиты космических аппаратов (КА) в инфракрасном диапазоне излучения и потому очень удобна в качестве ориентира. Разные схемы построителей местной вертикали (ПМВ) выбираются в зависимости от задач, поставленных перед конкретным КА.

**1.1. ПМВ 8201-В4МН.** Известны ПМВ сканирующего типа [2, 3], используемые в настоящее время в составе активных КА. Данные устройства предназначены для ориентации двух осей КА (крена и тангажа) относительно местной вертикали и охватывают область среднеэллиптических орбит в диапазоне высот от 300 до 1200 км. Они представляют собой прецизионные оптико-электронные приборы с погрешностью в пределах  $10' - 15'$  ( $3\sigma$ ).

В интересах создания построителя местной вертикали для малых космических аппаратов была проведена работа по модернизации конструкции существующих приборов с целью дальнейшего уменьшения габаритов и массы, повышения помеховой и радиационной стойкости.

При разработке оптической части прибора 8201-В4МН были приняты меры для существенного уменьшения массы и габаритов прибора по сравнению с существующими модификациями ПМВ (рис. 1) с сохранением точности.

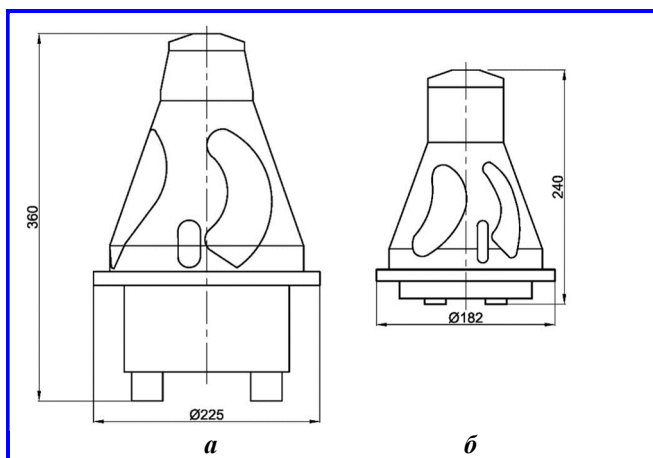


Рис. 1. Сравнение габаритов прибора 8201-В4 МН (а) и оптического блока 8201-В4МН (б)

С целью исключить подработки выходных сигналов прибора от Луны в полной фазе угловое поле зрения объектива было увеличено в 1,5 раза. Благодаря уменьшению диаметра входного зрачка объектива на  $\approx 40\%$  при сохранении его светосилы соответственно были уменьшены размеры и других элементов оптической схемы и конструкции прибора в целом.

Электронный блок прибора выполнен в отдельном корпусе, что позволяет при рациональной установке блока на КА повысить защиту электронной части от внешних воздействий.

Оптическая система приборов преобразует равномерное вращение мгновенного поля зрения ( $3^\circ \times 3^\circ$ ) по конусу в четыре радиальных сечения ИК-горизонта Земли.

Малые габариты и масса достигаются благодаря использованию легких металлических зеркал, современных электрорадиоизделий (ЭРИ) и микропроцессора, а также за счет моноблочного исполнения прибора в негерметичном корпусе.

Высокое соотношение сигнал/шум обеспечивается использованием широкого спектрального диапазона 7 – 25 мкм. Для достижения высокой точности измерения углов отклонения оси КА от местной вертикали используется автоматическая компенсация методических погрешностей на каждом цикле сканирования и временная фильтрация получаемой информации. При использовании в приборах типа сканирования линейность и крутизна выходной характеристики не зависят от вариаций яркости горизонта и изменения условий эксплуатации.

Предусмотрена алгоритмическая защита от помеховых источников излучения, причем селекция Солнца выполняется статическими датчиками, поля зрения которых перекрывают зоны траекторий сканирования основного поля прибора.

При попадании в одно из радиальных сечений элементов конструкции КА (антенн или солнечных батарей) по команде из бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ) включается компенсационный алгоритм замены информации данного сечения.

На данный момент разработан комплект чертежей к данному прибору.

**1.2. ПМВ 8201 КФ-2.** 8201-КФ2 представляет собой малогабаритный прибор радиационно-балансного типа, который предназначен для ориентации относительно ИК-вертикали двух осей КА, вращающегося на круговых орбитах в диапазоне высот от 180 км до геостационара. Такой прибор может использоваться вместе с прецизионными звездными датчиками для поиска и захвата Земли в начальной стадии работы КА, а также в аварийном режиме для

сохранения управляемости КА в случае кратковременного выхода из строя звездного датчика, а также на КА, не требующих высокой точности ориентации.

Прибор разработан в виде моноблока в негерметичном исполнении. Он содержит параболический объектив, приемник излучения и пирамиду из четырех зеркал, направляющих части поля обзора прибора на ИК-горизонт Земли в четырех направлениях по направлению тангажа и крена (рис. 2).

Принцип действия прибора основан на радиационном балансе потоков лучистой энергии по каналам тангажа и крена, причем последовательный просмотр зон ИК-горизонта осуществляется с помощью модулятора, который вращается электродвигателем с частотой 20 Гц. Для определения направления отклонения используется электронно-оптический генератор опорных напряжений.

Изменением угла пирамиды осуществляется настройка прибора для конкретной высоты полета.

**1.3. ПМВ 8201-КЧ.** Прибор 8201-КЧ предназначен для определения отклонения относительно местной вертикали одной из осей КА, вращающегося на сильно вытянутой эллиптической орбите.

Принцип действия прибора представлен на рис. 3 и заключается в получении информации о положении плоскости, содержащей местную вертикаль Земли, в системе координат прибора путем возвратно-поступательного механического сканирования пространства малым угловым полем. Амплитуда сканирования выбирается исходя из диапазона высот полета и может автоматически регулироваться для повышения точности. Кроме того, может автоматически или по команде с Земли изменяться положение

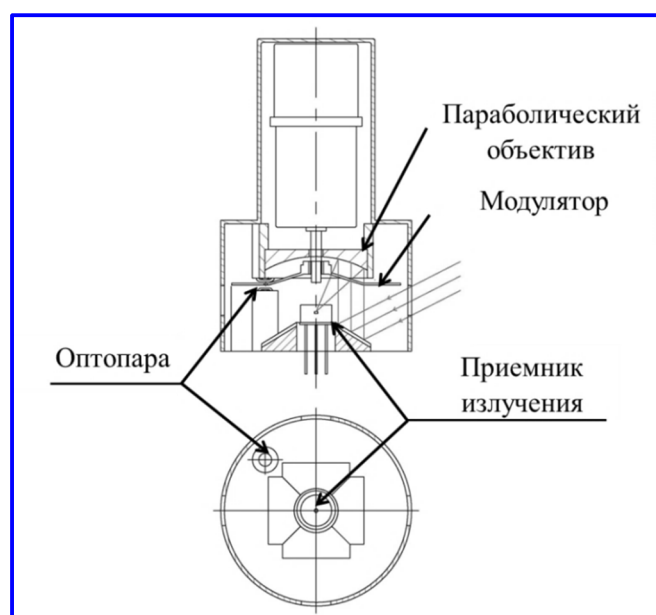


Рис. 2. Схема оптической части прибора КФ-2

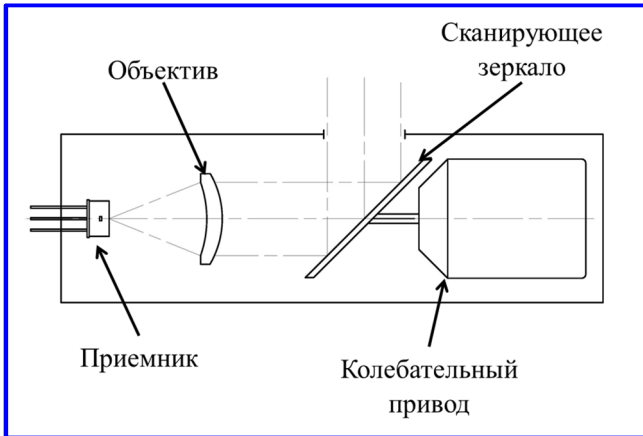


Рис. 3. Схема оптической части прибора 8201-КЧ

центра сканирования, что позволяет осуществлять ориентацию оси КА на «вынесенную точку», т. е. на цель, отстоящую от местной вертикали.

Колебательное сканирование обеспечивается электромеханическим приводом с фотоэлектрическим преобразователем «угол – код», разработанным АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

Прибор находится на стадии проектирования.

**1.4. Статический ПМВ.** В данный момент ОНПЦ ведет исследовательскую работу по разработке устройства ориентации по Земле на основе неохлаждаемой инфракрасной многоэлементной микроболометрической матрицы отечественного производства (рис. 4). Данная разработка позволит улучшить характеристики приборов в следующих направлениях:

- повысить надежность за счет исключения электромеханического привода;
- упростить конструкцию и снизить трудоемкость, уменьшив количество прецизионных оптических и механических деталей;
- снизить массу и габаритные размеры;
- повысить точность приборов путем осреднения информации с больших участков горизонта Земли, а не с трех – четырех точек, как в приборах секущего типа;
- обеспечить ориентацию при попадании в поле обзора помеховых источников излучения (Солнца или Луны) путем исключения информации от части пикселей матрицы.

Расчетная точность ПМВ при использовании предлагаемых технических решений характеризуется предельной погрешностью  $3\sigma$  не более  $6'$  в диапазоне углов рассогласования  $\pm 3^\circ$ .

## 2. Приборы ориентации по Солнцу

Положение Солнца, непрерывно излучающего мощный поток электромагнитной энергии и име-

ющего небольшой размер видимого диска (всего около 30 угловых минут) относительно связанной со звездами инерциальной системы координат, известно для любого момента времени. Поэтому солнечные датчики широко используются в системах ориентации КА. Кроме этого, сигналы солнечных датчиков используются для ориентирования панелей солнечных батарей КА, являющихся источником электроэнергии в космосе.

**2.1. Солнечные датчики.** В составе систем ориентации панелей солнечных батарей и корпуса КА серии «Метеор-М» применяется солнечный датчик 83001 разработки ОНПЦ. Поле обзора датчика включает в себя четыре зоны  $69^\circ \times 25^\circ$ , которые частично перекрывают друг друга, что позволяет использовать его как в однокоординатном, так и в двухкоординатном режиме.

**2.2. Солнечный датчик ДСМ-1.** В настоящее время для более удобного расположения на малогабаритных КА ведется разработка прибора ДСМ-1. Данное устройство имеет габариты, уменьшенные в  $\approx 1,5$  раза (рис. 5) по сравнению с используемым датчиком 83001, и массу 200 г против 500 г.

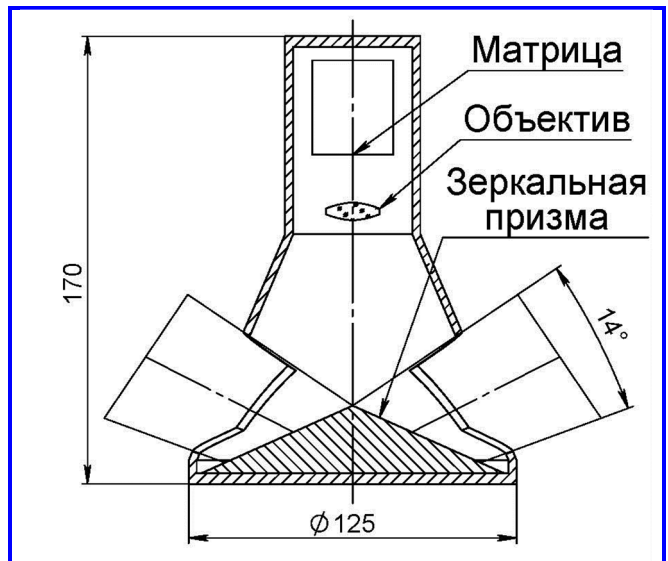


Рис. 4. Схема оптической части ПМВ СТ

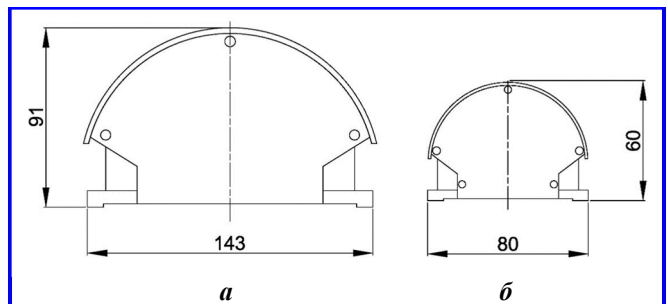


Рис. 5. Сравнение габаритов прибора 83001 (а) и ДСМ-1 (б)

Поле обзора датчика включает в себя четыре зоны  $69^\circ \times 25^\circ$ , которые частично перекрывают друг друга, что позволяет использовать его как в однокоординатном, так и в двухкоординатном режиме.

### 2.3. Точные датчики направления на Солнце.

Разработанные ОНПЦ точные датчики направления на Солнце [1] предназначены для измерения отклонений осей прибора от направления на энергетический центр Солнца. В одном исполнении (датчик ТДСо) в качестве приемника излучения использовался позиционно-чувствительный одномерный фотодиод (ПОФ), в другом (датчик ТДСк) – использовались одноэлементные фотодиоды.

2.3.1. ТДСо. На рис. 6 показан макет датчика ТДСо. Чувствительный элемент датчика представляет собой одномерный фотодиод. Регулируемая щелевая диафрагма формирует световой штрих, перпендикулярный линейке приемника. При отклонении оси прибора от направления на Солнце штрих перемещается от середины линейки, меняя сигнал пропорционально угловому отклонению.

2.3.2. ТДСк. В оптическом блоке датчика ТДСк четыре фотодиода ФД-10К расположены под углом в  $45^\circ$  по отношению к оси прибора, направленной на Солнце, как показано на рис. 7. При отклонении оси прибора от направления на Солнце токи двух противоположных фотодиодов меняют свое значение в соответствии с косинусом угла отклонения. При вычислении угла отклонения разностные сигналы от противоположных фотодиодов нормируются делением на суммарный сигнал: 
$$U = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2}$$

Это позволяет исключить погрешности из-за постоянных или медленно меняющихся факторов, таких как разная чувствительность или температура фотодиодов.

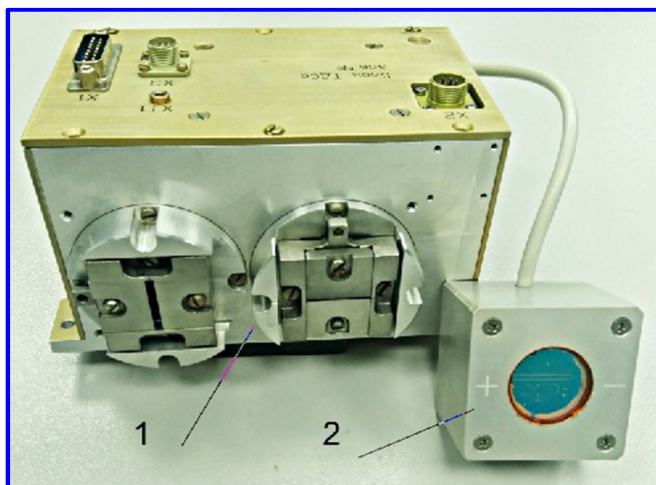


Рис. 6. Внешний вид макета датчика ТДСо: 1 – датчик ТДСо; 2 – позиционно-чувствительный фотодатчик, установленный внутри ТДСо

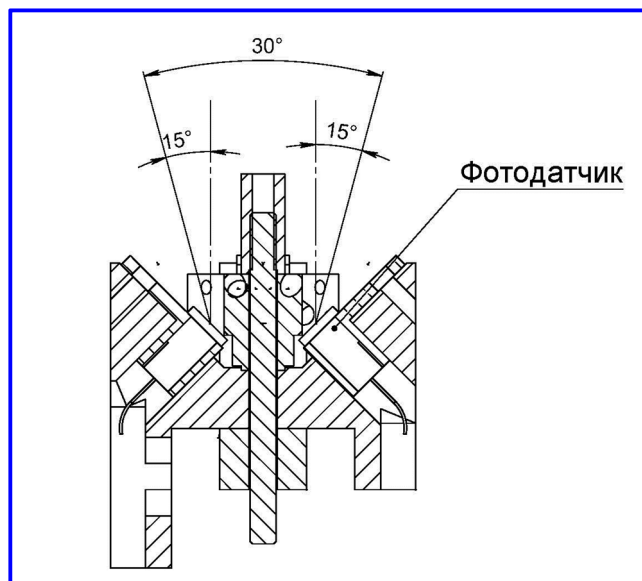


Рис. 7. Схема оптического блока ТДСк

Лабораторные испытания подтвердили расчетную точность датчиков Солнца, которая составляет не менее  $3'$ .

### Заключение

Рассмотрены технические решения, использованные ОНПЦ АО «Корпорация «ВНИИЭМ» при создании датчиков ориентации на центр Земли или датчиков Солнца, используемых в составе систем ориентации КА. Каждая схема разработана на основе актуальных для современных КА требований к устройствам ориентации и позволяет создать устройство, четко отвечающее требованиям заказчика для каждой конкретной системы по ряду параметров, таких как точность, массогабаритные характеристики, высотный диапазон работы и т. д. На данный момент разработан комплект чертежей к одному из устройств (8201-В4МН).

Представленные научно-техническому совету АО «Корпорация «ВНИИЭМ» инициативные работы ОНПЦ были одобрены. Советом было принято решение рекомендовать ОНПЦ продолжить разработки. В настоящее время дальнейшие этапы разработки требуют рефинансирования для проведения макетирования с целью подтверждения заявленных технических характеристик описанных вариантов приборов ориентации и их дальнейшего внедрения.

### Литература

1. Васильев В. Н. Системы ориентации космических аппаратов / В. Н. Васильев. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – 310 с.
2. Патент РФ № 185146 Российская Федерация, МПК В64G 1/24 (2006.1). Низкоорбитальный космический аппарат с устройством ориентации по Земле :

№ 2017130874 : заявл. 31.08.2017 ; опубл. 22.11.2018 / Михайлов Е.Н., Умов Р.Д., Гандлевский Ю.М. [и др.].

3. Оценка точности инфракрасных построителей местной вертикали по результатам летных испыта-

ний / Ю. М. Гандлевский, Е. Н. Михайлов, Ю. С. Мосолова [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2014. – Т. 141. – № 4. – С. 31 – 38.

Поступила в редакцию 03.08.2020

*Александр Викторович Мельников, инженер I категории, e-mail: melnikov20082009@yandex.ru.*

*Евгений Николаевич Михайлов, кандидат технических наук, начальник Оптического научно-производственного центра.*

*Александр Ефимович Рабовский, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: Raskiy@mail.ru.*

*T. (495) 366-33-92.*

*(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

## PERSPECTIVES FOR DEVELOPMENT OF SOLAR AND EARTH SENSORS TO SPACECRAFT ATTITUDE CONTROL

**A. V. Melnikov, E. N. Mikhailov, A. E. Rabovskii**

*The results of the activities of the Optical Research and Production Center (ORPC) of JC «Corporation «VNIEM» in the designing spacecraft in cooperation with Russian enterprises and in international projects are presents in the article. The center specializes in creating optoelectronic devices for spacecraft orientation by the IR horizon of the Earth are the local vertical sensors and by the Sun are solar sensors. An overview of the principles of operation of the existing orientation sensors produced by JC «Corporation «VNIEM» as well as the schemes of devices designed by ORPC is given. A comparative analysis of the technical characteristics: weight, dimensions and accuracy and functionality of the devices and the areas of their application is given. The factors that restrain the development process and the implementation of the designed devices are noted.*

**Key words:** optical system, orientation and navigation systems, Earth sensor, solar sensor.

### References

1. Vasilev V. N. Spacecraft attitude control systems / V. N. Vasilev. – Moscow : FSUE ‘NPP VNIEM’, 2009. – 310 p.
2. RF patent No. 185146 Russian Federation, IPC B64G 1/24 (2006.1). Low Earth orbit spacecraft with Earth pointing device : No. 2017130874 : appl. 31.08.2017 ; publ. 22.11.2018 / Mikhailov E. N., Umov R. D., Gandlevskii Iu. M. [et al.].
3. Assessment of accuracy of infrared local vertical plotters based on flight test results / Iu. M. Gandlevskii, E. N. Mikhailov, Iu. S. Mosolova [et al.] // Matters of electromechanics. VNIEM proceedings. – Moscow : «JSC Corporation VNIEM», 2014. – V. 141. – No. 4. – Pp. 31 – 38.

*Aleksandr Viktorovich Melnikov, Engineer (1<sup>st</sup> category), e-mail: melnikov20082009@yandex.ru.*

*Evgenii Nikolaevich Mikhailov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Head of Optical Research and Production Center.*

*Aleksandr Efimovich Rabovskii, Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Senior Researcher, e-mail: Raskiy@mail.ru.*

*T. (495) 366-33-92.*

*(JC «VNIEM Corporation»).*