



# Перспективы использования панорамных систем для построителя местной вертикали

В.А. Соломатин<sup>1</sup>✉, И.П. Торшина<sup>1</sup>,  
А.О. Круглов<sup>2</sup>✉, Д.С. Афанасов<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

<sup>2</sup> АО «Швабе», Москва, Россия

✉ vsolomatin@mail.ru

✉ a.kruglov@shvabe.com

✉ d.afanasov@shvabe.com

**ЦИТИРОВАНИЕ** Соломатин В.А., Торшина И.П., Круглов А.О., Афанасов Д.С. Перспективы использования панорамных систем для построителя местной вертикали // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2023. Т. 67. № 4. С. 146–156. DOI:10.30533/GiA-2023-029.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** космический летательный аппарат, построитель местной вертикали, оптический датчик, приемник излучения, панорамная оптическая система, PAL-линзы

**АННОТАЦИЯ** Эксплуатация космического аппарата невозможна без его пространственной ориентации, обеспечивающей определенное положение осей аппарата относительно некоторых заданных направлений. Ориентация необходима, в частности, для направления солнечных батарей, обеспечивающих аппарат электрической энергией, на Солнце, для проведения научных экспериментов, для навигационных измерений и передачи информации на Землю. Важнейшим элементом системы ориентации космического аппарата является построитель местной вертикали (ПМВ) — бортовой прибор космического аппарата, определяющий направление на центр Земли или в общем случае на центр планеты, вокруг которой обращается космический аппарат. Принципы построения ПМВ могут быть различны, однако на практике для ориентации по Земле получили распространение оптико-электронные ПМВ, работающие в инфракрасной области спектра электромагнитных волн 8–16 мкм, соответствующем собственному тепловому излучению Земли, что позволяет определять горизонт Земли независимо от положения Солнца. По сей день в действующих

ПМВ используется оптико-механическое сканирование, предполагающее применение подвижных механических узлов в составе ПМВ. В статье рассмотрены схемы и принципы построения ПМВ, параметры и характеристики существующих технических решений, отмечены их достоинства и недостатки. Предложено новое запатентованное техническое решение ПМВ на основе панорамной зеркально-линзовой системы в сочетании с использованием матричных фотоприемников, обеспечивающее малые габариты и энергопотребление, возможность работы ПМВ в широком диапазоне высот орбит, включая низкие.

## 1 Введение

В течение последних десятилетий развитие космических систем является движущей силой технологического развития страны, в которых, в свою очередь, важнейшей составляющей являются оптико-электронные приборы и комплексы, позволяющие производить ориентацию космических аппаратов в пространстве, обеспечивать наблюдение из космоса и проводить различного рода измерения. Ежегодные научные исследования в области оптических космических систем, проводимых предприятиями, научными институтами, высшими учебными заведениями позволяют разрабатывать все новые технические решения, которые в значительной степени повышают тактико-технические характеристики космических летательных аппаратов. Стоит отметить, что будущие долгосрочные полеты в космос, в т.ч. при наличии экипажа на борту космического аппарата, требуют от науки принципиально новых научно-технических и технологических решений в каждом направлении, и оптические системы не исключение.

Кроме того, в апреле 2022 г. Правительством Российской Федерации был одобрен проект Государственной корпорации «Роскосмос» – «Сфера»<sup>1</sup>. Проект «Сфера» – проект российской глобальной многофункциональной инфокоммуникационной спутниковой системы (ГМИСС), федеральная целевая программа (ФЦП) комплексного развития космических информационных технологий на период до 2030 года, включающая в себя космические проекты в различных областях. Данный проект подразумевает запуск спутников связи и спутников дистанционного зондирования Земли. Аппараты будут предоставлять широкополосный доступ в сеть Интернет для 50 миллионов пользователей. Также «Сфера» обеспечит специальную связь – президентскую, правительственную, ведомственную<sup>1,2</sup>. По своему наполнению и функционалу «Сфера» превосходит все космические проекты, ранее реализованные в Российской Федерации. Впервые в истории российской, а может быть, и мировой космонавтики появится возможность соединить воедино услуги связи, передачи данных, навигации и дистанционного зондирования Земли. Согласно представленной ГК «Роскосмос»

1 Проект «Сфера» переходит к практической реализации. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru/33771/> (дата обращения: 17.08.2023).

2 Василий Кучушев. Первенец космической «Сферы». В чем уникальность нового российского спутника «Скиф-Д». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tass.ru/kosmos/16140271> (дата обращения: 17.08.2023).

информации, в рамках проекта «Сфера» запланировано к запуску более 350 КА до 2030 года<sup>3</sup>.

Учитывая, что сегодня развитию космических систем государством уделяется особое внимание, в частности, развитию низкоорбитальной группировки спутников, актуальной проблемой является разработка оптико-электронной аппаратуры, обеспечивающей функционирование космических аппаратов, в частности разработка современных построителей местной вертикали (ПМВ). В статье рассматриваются существующие технические решения и предлагается новое, разработанное нами перспективное решение, основанное на использовании панорамной зеркально-линзовой системы в сочетании с матричным приемником излучения. Это решение позволяет отказаться от механического сканирования, уменьшить габариты и энергопотребление ПМВ и обеспечить работу системы ориентации в широком диапазоне орбит, включая низкие орбиты.

## 2 Построители местной вертикали

### 2.1 Общие положения

Построители местной вертикали, как датчики ориентации КА в космическом пространстве на окружающие его планеты, подразделяются на две группы:

1. работающие по собственному тепловому излучению планет;
2. работающие по отраженному планетой солнечному излучению.

**Достоинствами датчиков первой группы** являются:

1. Более простая схема обработки сигналов вследствие того, что планеты в инфракрасном диапазоне (создают оптическое излучение) по всему лимбу (отраженное излучение планет изменяется в зависимости от фазы).
2. Возможность использования датчиков днем и ночью.

**К достоинствам датчиков второй группы**, работающих по отраженному свету, относят:

1. Сравнительную дешевизну и простоту конструкции.
2. Возможность использования мозаичных приемников видимого диапазона, которые имеют меньшую постоянную времени, устойчивость к изменению температуры, позволяют обеспечить соотношение «сигнал/шум» порядка 5000 против 30–100 для приемников инфракрасного диапазона [1].

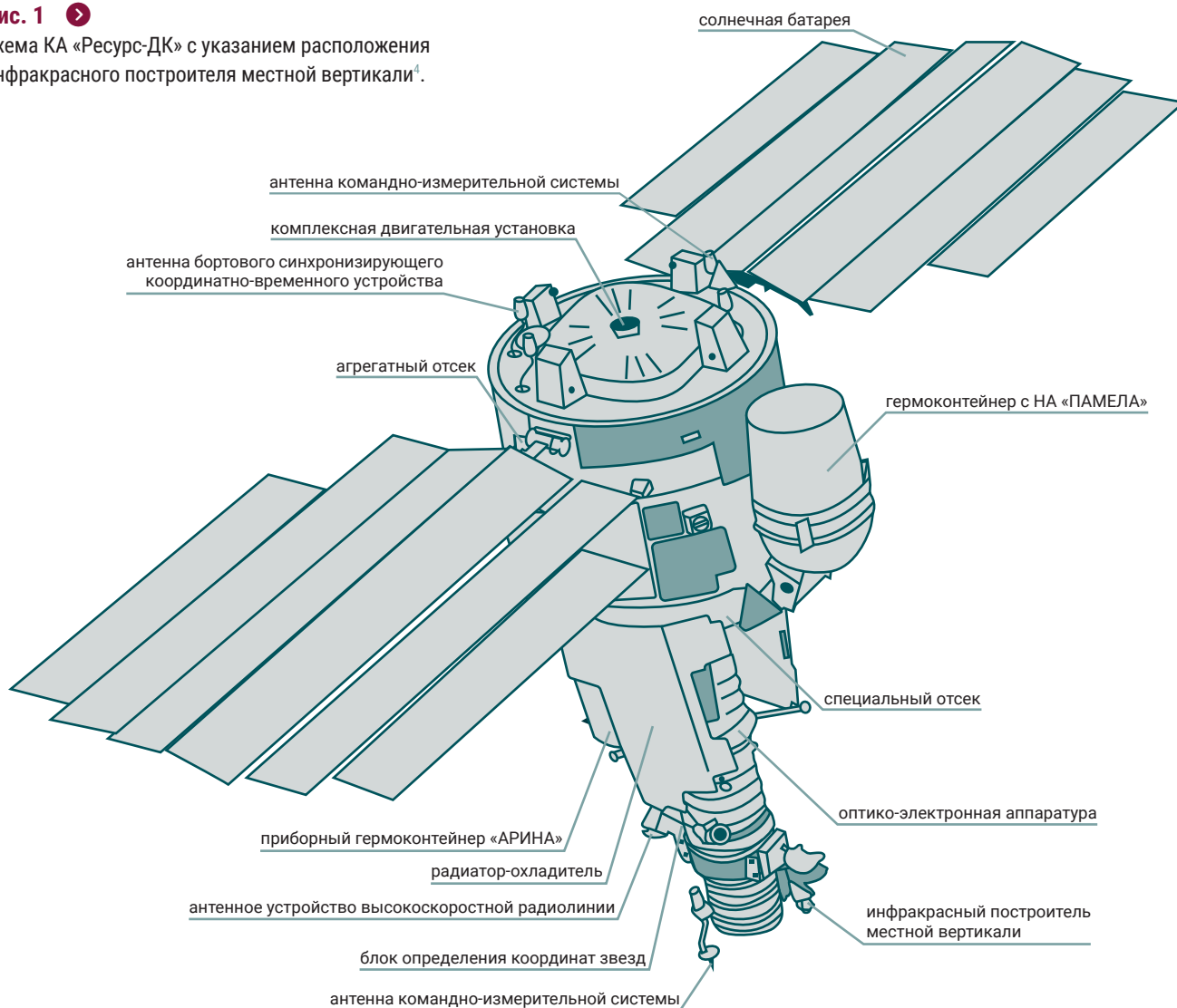
На Рисунке 1<sup>4</sup> представлена схема КА «Ресурс-ДК», предназначенного для многозонального дистанционного зондирования земной поверхности с целью получения в масштабе времени, близком к реальному, высокоинформативных изображений в видимом диапазоне спектра). На схеме показано расположение инфракрасных ПМВ.

<sup>3</sup> Антон Курилов. Появился «наш ответ Starlink». Как будет работать? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://4pda.to/2022/10/24/405411> (дата обращения: 17.08.2023).

<sup>4</sup> Космический аппарат «Ресурс-ДК». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ntsomz.ru/resurs-dk> (дата обращения: 17.08.2023).

**Рис. 1** ➔

Схема КА «Ресурс-ДК» с указанием расположения инфракрасного построителя местной вертикали<sup>4</sup>.



## 2.2 Схемы построителей местной вертикали

Принципиальная схема ПМВ определяется выбранным спектральным диапазоном и способом индикации направления падающего излучения. По способу индикации направления построители делятся на статические и сканирующие.

Статические ПМВ функционируют по принципу сравнения освещенности противоположных краев диска планеты. Характерной особенностью этих построителей является отсутствие подвижных частей и использование для обработки сигнала рассогласования амплитудного анализатора. Наиболее простым примером статического ПМВ является четырехканальный прибор, у которого угловые поля расположены попарно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Оптические оси каналов отклонены от ориентируемой оси космического аппарата на один и тот же угол. Значение угла зависит от высоты орбиты и выбирается так, чтобы оптические оси каналов совпадали с касательными к земной поверхности. Угловое поле приемника каждого прибора выбирают из двух условий:

1. На приемник излучения должны одновременно проектироваться земная поверхность с окружающей атмосферой и космическое пространство.
2. Построитель вертикали должен работать при изменении высоты полета КА в заданных пределах.

Формирование сигналов рассогласования по тангажу и крену осуществляется достаточно просто. Приемники излучения каждой пары каналов включены на вход усилителей навстречу друг другу. При этом одна пара приемников обеспечивает формирование сигналов рассогласования по тангажу, а вторая – по крену.

При такой схеме выходные сигналы рассогласования оказываются пропорциональными величинам углов отклонения оси рыскания от направления местной вертикали по тангажу и крену, если отклонение не превышает размеров углового поля одного канала. Когда величина угла отклонения больше соответствующего размера углового поля, но не превосходит угол между осями каналов, выходной сигнал рассогласования постоянен по величине и равен своему максимальному значению.

Принцип построения местной вертикали с использованием четырехканального не сканирующего устройства показан на Рисунке 2.

**Ключевые параметры построителей местной вертикали** (не сканирующего типа) следующие:

- приборы, построенные по данному принципу, имеют линзовый германиевый объектив и германиевый фильтр;
- спектральный диапазон 14–15 мкм;
- погрешность определения вертикали  $5,22 \cdot 10^{-2}$  рад.

**Достоинства построителя:**

- отсутствие подвижных частей;
- малая масса (3 кг) и габаритные размеры;
- небольшая потребляемая мощность (менее 6 Вт).

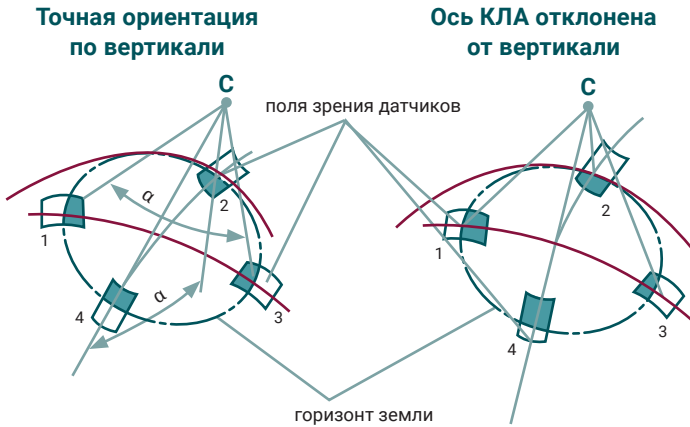
**Недостатки построителя:**

- малый диапазон изменения высоты полета летательного аппарата (ЛА) (от 80 до 1600 км);
- обеспечение работы только при полете ЛА по орбитам, близким к круговым.

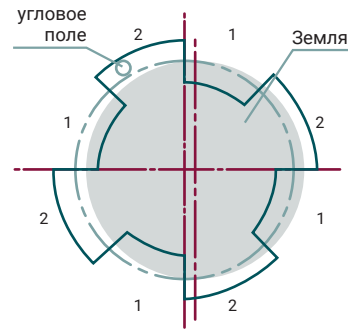
В настоящее время в ПМВ в большинстве случаев осуществляется оптико-механическое сканирование, а именно реализуются принципы кругового и секущего сканирования. Такие приборы получили достаточно широкое распространение. Вариант оптической схемы построителя местной вертикали с круговым сканированием рассмотрен в [2]. Принцип действия этого прибора состоит в следующем.

Оптическая система (Рис. 4) производит обзор пространства по сложной траектории (Рис. 3), на движение по окружности накладывается периодическое смещение вдоль радиуса.

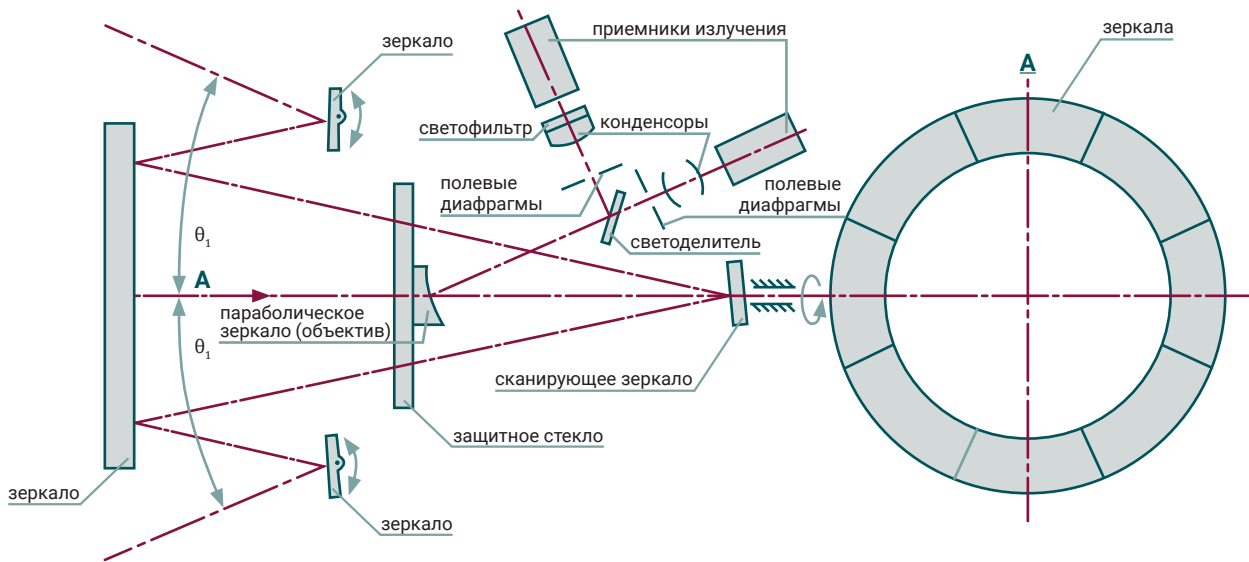
Излучение Земли (если оно попадает в угловое поле) через оптическую систему поступает на приемник излучения канала Земли и преобразуется в электрический сигнал, который через предусилитель проходит на два резонансных усилителя, выделяющих первую гармонику сигнала, несущую информацию о величине и направлении рассогласования между направлением на центр Земли и осью визирования прибора. Первая гармоника сигнала выделяется двумя фазочувствительными детекторами,



**Рис. 2** ⬆️  
Принцип построения местной вертикали с использованием четырехканального не сканирующего устройства [2].



**Рис. 3** ⬆️  
Движение углового поля по окружности при круговом сканировании [2].



**Рис. 4** ⬆️  
Оптическая система построителя местной вертикали [6].

и используется для формирования управляющих сигналов по каналам крена и тангажа. Если в угловое поле попадает Солнце, то на входе блока подавления помехи от Солнца появляется сигнал, который поступает на предусилитель и в схему реверса, запрещая формирование управляющих сигналов и подстройку зеркал.

**Основные параметры прибора:**

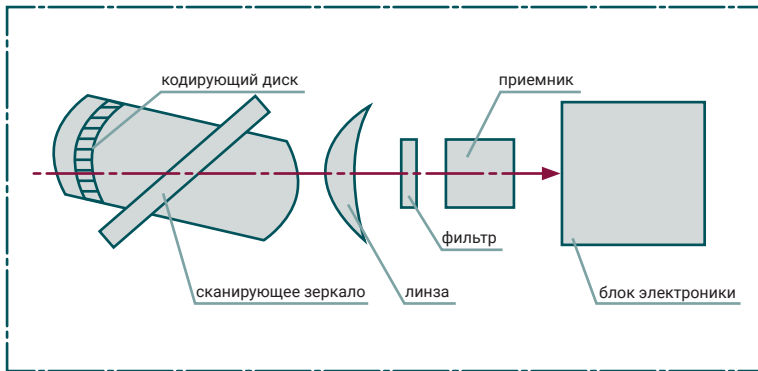
- диапазон высот от 150 до 500 км;
- мгновенное угловое поле 3°;
- погрешность определения направления на центр Земли, соответствующего нулю управляющих сигналов, не более 14';
- крутизна управляющих сигналов по каналам крена и тангажа (0 ±0,14) В/град;
- диапазон линейности управляющих сигналов 2°;
- напряжение питания 27<sup>+7</sup><sub>-4</sub> В;
- потребляемая мощность не более 10 Вт, при включении внутреннего излучателя не более 14 Вт;

- масса прибора  $7 \pm 1,5$  кг;
- ресурс 3000 ч.

Недостатком этого устройства является ограниченный диапазон высот орбит и сложность конструкции оптической системы.

**Рис. 5** 

Принципиальная схема датчика фирмы LMSC<sup>5</sup>.



Другим вариантом использования оптико-механического сканирования в МВ является прибор, разработанный компанией LMSC (Рис. 5)<sup>5</sup>. Сканирование осуществляется двумя мгновенными угловыми полями

при помощи вибратора с электромагнитным приводом. Нелинейность движения угловых полей компенсируют в процессе обработки сигнала, соответствующего углу поворота сканирующей оси, в цифровой форме. Для этого на зеркале укреплен кодирующий диск с муаровым растром, с которого снимают отсчеты, пропорциональные углу поворота в моменты пересечения полями зрения границы Земля–Космос и Космос–Земля. Угол тангажа определяют сравнением отклонений

середины импульсов входа  $t_1$  и выхода  $t_2$  от опорного импульса, а угол крена – разностью промежутков двух полей:

**1** 

$$\Delta t = t_2 - t_1.$$

При прохождении поля зрения по планете приемник излучения создает импульс напряжения, временное положение которого определяет направление вертикальной оси<sup>5</sup>. Солнечное (прямое и отраженное) излучение задерживается поглощающим фильтром. Построитель дает возможность производить стабилизацию и ориентацию космического аппарата в широких пределах изменения высоты полета.

**Основные характеристики прибора:**

- погрешность  $\pm 0,05^\circ$ ;
- линейная зона по тангажу  $\pm 10''$ ;
- линейная зона по крену  $\pm 2,5^\circ$ ;
- диаметр входного зрачка 38 мм;
- мгновенное угловое поле  $1,1 \times 1,1^\circ$ ;
- спектральный диапазон 14,1–15,8 мкм;
- габаритные размеры 178×114×108 мм.

**Для построения местной вертикали используют два датчика**

с параметрами:

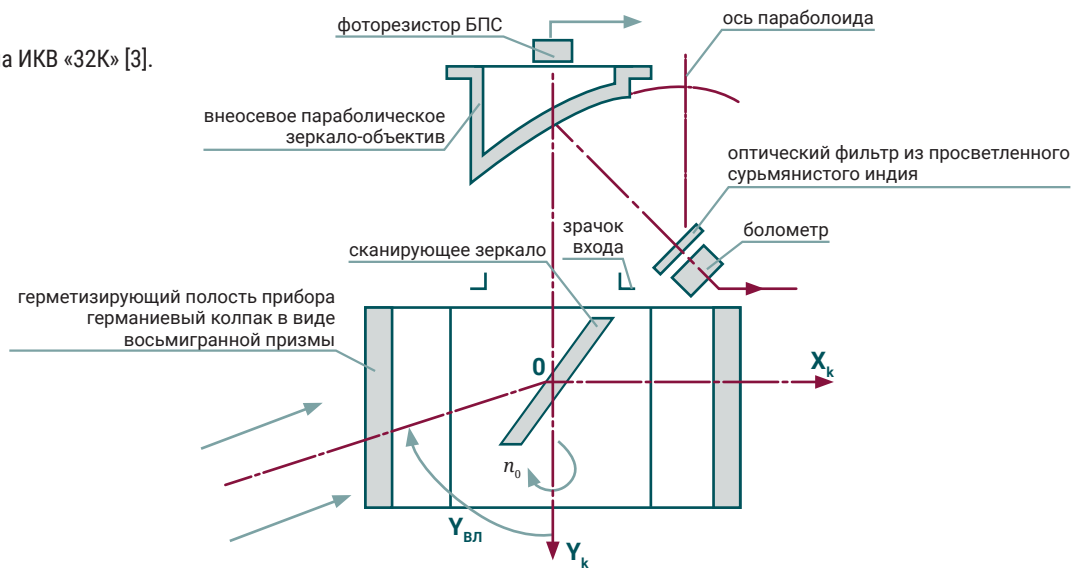
- масса 2–3 кг;
- потребляемая мощность 6 Вт;
- погрешность  $0,25^\circ$ ;
- спектральный диапазон 3–12 мкм;
- в качестве чувствительного элемента использован сурьмянистый индий.

Подобный построитель использован на спутниках «Меркурий» и «Нимбус». Основной недостаток – малый диапазон измерений.

<sup>5</sup> Криксунов Л.З., Волков В.А., Вялов В.К. и др. Справочник по приборам инфракрасной техники / Под ред. Криксунова Л.З. К.: Техника, 1980. 230 с.

Известной отечественной разработкой является инфракрасный построитель местной вертикали ИКВ 32<sup>6</sup> [3]. Прибор работает по следующему принципу (Рис. 6). Модулированное по амплитуде и начальной фазе за счет вращения сканирующего зеркала излучение от инфракрасного горизонта планеты собирается оптической системой построителя в плоскости чувствительного слоя болометра. Усиленный с выхода болометра сигнал, через электронный ключ поступает на вход фазочувствительного детектора. С его помощью в процессе сравнения начальной фазы сигнала рассогласования с фазами двух опорных напряжений, вырабатываемых генератором этих напряжений, производится разложение сигнала на две составляющие, которые после их выделения электрическими фильтрами поступают в систему управления для разворота корабля вокруг его осей и до устранения угла рассогласования. Для подавления сигнала помехи, возникающего при попадании Солнца в угловое поле прибора, предусмотрен блок подавления Солнца, датчиком которого является фоторезистор. По команде сигнала от этого блока построитель отключается от системы управления до тех пор, пока Солнце не выйдет за пределы углового поля прибора.

**Рис. 6** ➤  
Оптическая схема ИКВ «32К» [3].



**Основные параметры прибора:**

- диаметр входного зрачка 20 мм;
- фокусное расстояние 19 мм;
- угловое поле 3°;
- спектральный диапазон 8–14 мкм;
- угол наклона сканирующего зеркала может принимать два фиксированных значения.

Основным недостатком построителей местной вертикали с круговым сканированием является необходимость специальной подстройки угла наклона сканирующего зеркала при изменении высоты полета корабля [3].

6 Илюхин И.М. Оптико-электронные приборы угловой ориентации космических кораблей, Ч.1 и Ч.2. М.: Изд. МГТУ, 2000. 85 с.



## 2.3 Построители местной вертикали с панорамными зеркально-линзовыми объективами

В настоящее время доминируют **тенденции развития построителей местной вертикали**, которые по существу исключают использование оптико-механического сканирования, а именно тенденции по:

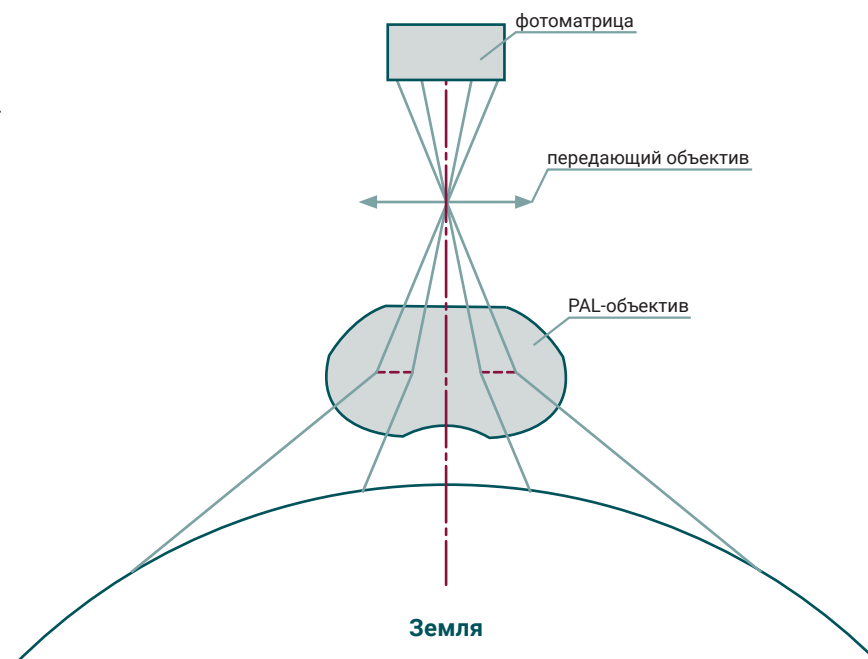
1. повышению надежности приборов как таковых;
2. снижению массы и габаритов прибора;
3. снижению энергопотребления, насколько это возможно;
4. обеспечению работы построителей местной вертикали в широком диапазоне орбит, включая низкие.

В таком случае, необходимо искать новые решения, соответствующие этим тенденциям. Решения, основанные на использовании панорамных систем, отлично подходят для данной задачи [4].

Функциональная схема ПМВ с использованием панорамного зеркально-линзового компонента PAL (англ. — «panoramic annular lens») показана на Рисунке 7. PAL создает кольцевое изображение пространства, соответствующее цилиндрической проекции. Важно отметить, что применение кольцевого панорамного объектива позволят получать изображение всего горизонта Земли при меньших габаритах и массе в сравнении с известными широкоугольными объективами типа «fisheye», а также без присущих системам «fisheye» пространственных искажений в преобразовании азимутального угла в диапазоне от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  [5].

При совпадении оптической оси системы с направлением на вертикаль, изображение Земли располагается в кольцевом угловом поле симметрично по отношению к ортогональным осям  $x, y$ . Это изображение переносится с помощью передающего объектива на фотоприемную матрицу. Сигналы

**Рис. 7** →  
Функциональная схема  
оптического блока ПМВ.



с элементов фотоприемной матрицы объединяют в столбцы и строки. Отклонение от вертикали рассчитывают по сигналам строк и столбцов, определяя энергетический центр изображения (по алгоритму центроиды). Смещение энергетического центра изображения по оси  $x$  относительно начала координат в центре углового поля определяют по сигналам столбцов фотоприемной матрицы как

$$2 \quad \Delta x = T_x (\sum_N s_{nx} n) / (\sum_N s_{nx}),$$

где  $T_x$  – пространственный период столбцов,  $s_{nx}$  – сигналы столбцов,  $n = 1, 2, 3... -1, -2, -3... -$  номер столбца,  $N$  – число столбцов.

Аналогично определяют смещение энергетического центра изображения по оси  $y$  относительно начала координат по сигналам строк фотоприемной матрицы по формуле:

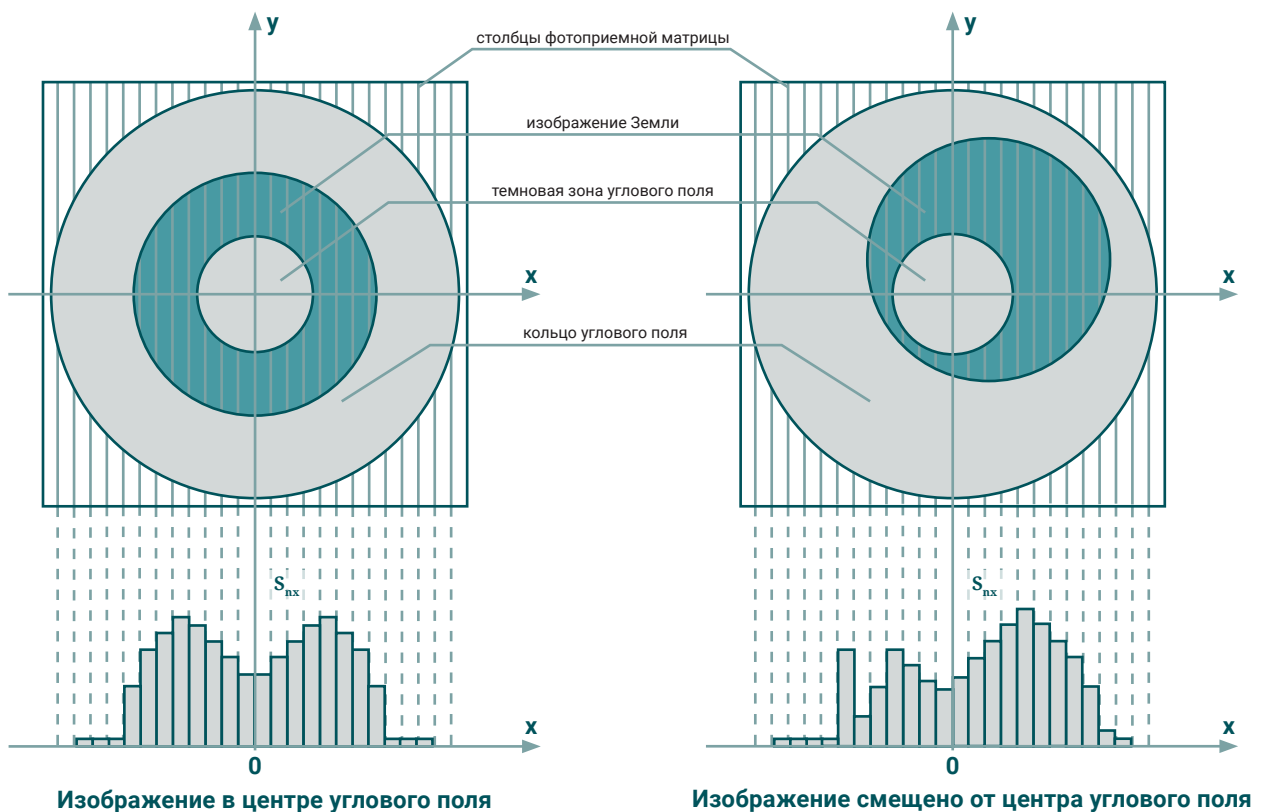
$$3 \quad \Delta y = T_y (\sum_M s_{my} m) / (\sum_M s_{my}),$$

где  $T_y$  – пространственный период строк,  $s_{my}$  – сигналы строк,  $m = 1, 2, 3... -1, -2, -3... -$  номер строки,  $M$  – число строк.

**Расчеты и предварительное макетирование показывают возможность обеспечения следующих параметров построителя местной вертикали:**

- диапазон высот орбит 170–6000 км;
- угловое поле 150°;
- темновое поле 70°;
- размер изображения 8,2 мм;
- эквивалентное фокусное расстояние системы –2,75 мм;
- спектральный диапазон 8–16 мкм;
- оптический материал – германий ( $n = 4,0052$  для  $\lambda = 10$  мкм).

**Рис. 8** Угловое поле построителя местной вертикали.



### 3 Результаты и выводы

Преимущества представленной в настоящей статье разработки ПМВ на основе панорамной оптической системы состоит в том, что она отвечает новым тенденциям в области развития строителей местной вертикали [6], а именно широкое угловое поле системы позволяет производить измерения на различных высотах орбит без перестройки структуры оптической системы, что существенно упрощает ее конструкцию, а как следствие и общую массу прибора. Координаты изображения Земли определяются с высокой точностью за счет использования интерполирования. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в современных реалиях активного развития панорамных систем, учитывая все недостатки, которые имеют строители местной вертикали на основе оптико-механического сканирования, перспективен и актуален переход на строители местной вертикали на основе панорамных оптических систем в сочетании с многоэлементными матричными приемниками излучения.


- БИБЛИОГРАФИЯ**
1. Соломатин В.А. Системы контроля и измерения с многоэлементными приемниками излучения. М.: Машиностроение, 1992. 128 с.
  2. Федосеев В.И. Колосов М.П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов. М.: Логос, 2007. 247 с.
  3. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы смотрящего типа. М.: Логос, 2004. 443 с.
  4. Соломатин В.А., Мельников А.В., Рабовский А.Е. Строитель местной вертикали с панорамным зеркально-линзовым объективом // Фотоника. 2017. № 6. С. 86–96. DOI:10.22184/1993-7296.2017.66.6.86.96.
  5. Соломатин В.А. Панорамная видеокамера // Фотоника. 2009. № 4. С. 26–28.
  6. Патент РФ на изобретение №2798264 / 20.06.23. Соломатин В.А., Торшина И.П. Откупман Д.Г., Мельников А.В. Способ построения местной вертикали.

#### АВТОРЫ

##### **Соломатин Владимир Алексеевич**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия

кафедра оптико-электронных приборов, факультет оптического приборостроения  
д-р техн. наук,

 0000-0002-8043-3943

##### **Торшина Ирина Павловна**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия

кафедра оптико-электронных приборов, факультет оптического приборостроения  
д-р техн. наук, доцент


##### **Круглов Александр Олегович**

АО «Швабе», Москва, Россия

##### **Афанасов Дмитрий Сергеевич**

АО «Швабе», Москва, Россия

канд. техн. наук

 0000-0002-7736-5513

Поступила 25.05.2023. Принята к публикации 21.08.2023. Опубликовано 28.08.2023.