



УДК 004.352:531.715.1:681.787

А. Ф. Вечерковский, П. Э. Егоров, А. Б. Милорадов, А. Б. Филатов

Бортовая система сканирования для фотоприемника с временной задержкой и накоплением заряда

Описана сканирующая система космического базирования, которая посредством плоского сканирующего зеркала и оптической системы обеспечивает преобразование пространства предметов во временную последовательность электронных сигналов фотоприемника с временной задержкой и накоплением зарядов. Высокая точность синхронизации опроса элементов фотоприемника и развертки пространства предметов происходит за счет движения сканирующего зеркала по показаниям бесконтактного интерферометрического датчика угла. Возвратно-вращательное сканирование плоским зеркалом кинетически скомпенсировано противоположным движением маховика, что сводит к минимуму остаточные возмущения на космическую платформу. Для сокращения импульсного энергопотребления и времени реверса между сканирующим зеркалом и компенсирующим маховиком применены магнитные рекуператоры энергии реверса.

Ключевые слова: сканер, интерферометр, зеркало, маховик, рекуператор.

Введение

При формировании глобального поля обзора с высоким пространственным разрешением для мониторинга поверхности Земли наиболее перспективным на сегодняшний день представляется фотоприемное устройство (ФПУ), работающее в режиме временной задержки и накопления (ВЗН) зарядов [1]. ФПУ с ВЗН осуществляет пространственно-временное преобразование информации, суть которого заключается в суммировании сигналов синхронно со сканированием n -фоточувствительных элементов, расположенных в направлении сканирования. Такое ФПУ требует высокой синхронизации считывания изображения с перемещением поля зрения по формируемому полю обзора с погрешностями не меньше единиц угловой секунды.

Подобная задача решается с помощью оптико-механической развертки системой сканирования плоским зеркалом, расположенным в параллельном ходе лучей. Развертка осуществляется из пространства предметов через оптическую систему в пространство изображений на линейки ФПУ с ВЗН синхронно с их опросами.

К системам глобального обзора Земли можно отнести геостационарный отечественный комплекс «Электро-Л» [2], разработанный для решения задач гидрометеорологии с реальным временем обновления информа-

ции в 10–30 мин. При этом задачи компенсации кинетических моментов, возникающих от многозонального сканирующего устройства, целиком возлагаются на систему стабилизации космического аппарата (КА), в результате чего происходит ее перегрузка. Наиболее близким по классу решения задачи является двухкоординатный *Scanner* глобального обзора, разработанный в США для мониторинга поверхности Земли в составе *SBIRS GEO* [3]. Однако в ходе работы были выявлены вибрации (*Jitter*) с взаимными влияниями на соседний оптико-механический канал *Starer*, что склонило разработчиков к отказу от его применения.

В данной статье показана возможность реализации сканера глобального обзора, созданного на отечественной элементной базе, для мониторинга поверхности Земли в целях национального контроля. При использовании широкоформатного ФПУ с ВЗН время полного обновления информации составляет 4,2 с, а погрешности сканирования – доли угловой секунды. При этом компенсация кинетического момента от сканирующего зеркала удовлетворяет требованиям КА.

Система сканирования

Блок-схема системы сканирования, включающая оптико-механическое сканирующее устройство (сканер) и блок контроллеров управления зеркалом и компенсирующим маховиком, имеющий резерв, показана на рис. 1.

Сканер обеспечивает развертку пространства предметов на линейки ФПУ со-



Рис. 1. Блок-схема системы сканирования

вместно с объективом посредством однокоординатного сканирования плоским зеркалом. Кинетический момент, вызванный поворотом зеркала, компенсируется при установке маховика, вращающегося в противоположную сторону. Для синхронизации опроса ФПУ с движением сканирующего зеркала блок контроллеров управления сканером (рис. 2) формирует синхроимпульсы начала кадра и направления сканирования.

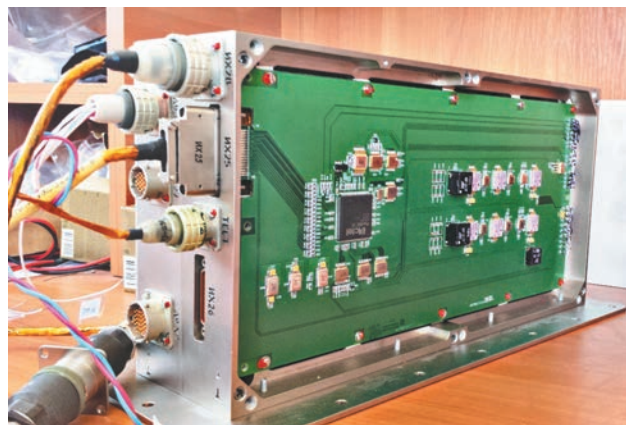


Рис. 2. Блок контроллеров сканера

Сканирующее зеркало выполнено из полированного бериллия с коэффициентом отражения в рабочем спектре оптического излучения не менее 0,9. Для лучшего отражения при использовании в ИК-диапазоне оно должно быть покрыто золотом. Зеркало базируется на трех точках опоры для равномерного распределения механических нагрузок по всему его объему и статической определенности. Ячеистая конструкция тыльной стороны зеркала служит для его облегчения, сохраняя при этом достаточную жесткость, необходимую для поддержания заданного качества зеркальной поверхности.

Для контроля положения сканирующего зеркала в пространстве и синхронизации его

движения со считыванием ФПУ сканер оснащается бесконтактным дифференциальным интерферометрическим датчиком углового положения, построенным по схеме интерферометра Майкельсона с лазерным источником излучения (далее – датчик зеркала). Его создание стало возможным благодаря появившемуся в последние годы высокостабильному лазерному излучателю космического исполнения [4].

Для исключения влияния кинетического момента реверсивно сканирующего зеркала на КА на сканер устанавливается маховик компенсации, который вращается в противоположную от движения зеркала сторону и имеет равный с зеркалом кинетический момент.

$$J_3 \omega_3 = J_M \omega_M, \quad (1)$$

где J_3 – момент инерции зеркала с оправой;
 ω_3 – угловая скорость вращения зеркала;
 J_M – момент инерции маховика компенсации;
 ω_M – угловая скорость вращения маховика.

При этом соблюдается условие коллинеарности осей вращения зеркала и маховика. Для контроля углового положения и текущей скорости маховика на него установлен бесконтактный магнитоэлектрический инкрементный датчик. Он включает неподвижное кольцо, на которое намотана катушка для создания однородного магнитного поля в неподвижном кольце с зубцами на венце, и вращающееся зубчатое колесо, установленное на маховик. Полный угол датчика маховика составляет 360° с интерполированным инкрементом отсчета $30'$. Благодаря однородному магнитному полю, создаваемому катушкой, погрешность датчика уменьшается в \sqrt{f} раз, где f – количество зубцов на венце датчика. Для рассма-



триваемого случая $f = 180$ и среднеквадратичное отклонение (СКО) погрешности датчика уменьшается в 13,4 раза.

Для обеспечения минимального времени переходного процесса после выхода из зоны реверса и обеспечения синхронного хода сканирующего зеркала используется специальный моментный электродвигатель с высокой линейностью создаваемого момента и малой электромагнитной постоянной времени $t_{эм} = 0,75$ мс.

В целях повышения коэффициента полезного действия сканирования (отношение времени обзора к времени кадра) и снижения импульсного энергопотребления во время реверса основную энергию реверса принимают на себя магнитные рекуператоры. При этом выполняется условие энергетического баланса между кинетической энергией W_k системы «маховик – зеркало» и магнитной энергией $W_{маг}$ рекуператоров

$$W_{маг} \geq W_k. \quad (2)$$

Рекомбинация кинетических моментов зеркала и компенсирующего маховика происходит в зоне реверса при смене знака вектора скорости зеркала и маховика на противоположный. При этом моделирование остаточного (нескомпенсированного) кинетического момента даже при наихудшем арифметическом сложении допусков конструкции кинематики сканера показывает, что его величина (рис. 3) не превышает требование КА на нескомпенсированный момент $M_{ост} \leq 0,005$ Н·м и гарантированно парируется системой стабилизации КА.

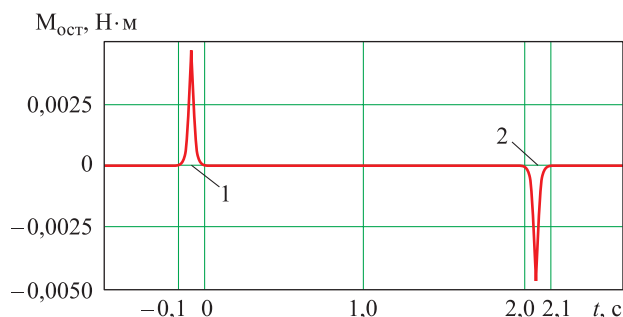


Рис. 3. Моделирование $M_{ост}$ во времени при наихудшем сложении допусков конструкции кинематики сканера:
1, 2 – зоны реверса сканера

В рекуператорах, как и в двигателе, используются магниты из NdFeB, покрытые никелем, для придания коррозионной стойкости, обладающие высокой удельной магнитной энергией ~ 360 кДж/м³.

Использование рекуператоров и минимизация остаточного кинетического момента требует выполнения не только равенства (1), но и равенства угловых моментов (3) с учетом отношения пройденных углов, моментов инерции зеркала и компенсирующего маховика K :

$$J_3 \alpha_3 = J_M \alpha_M, \quad (3)$$

где α_3 – диапазон угла вращения зеркала;

α_M – диапазон угла вращения маховика.

В результате $K = \alpha_M / \alpha_3 = J_3 / J_M$, в рассматриваемом случае $K = 50$.

Для контроля направления движения и диапазона перемещения зеркала и маховика используются бесконтактные концевые датчики. Принцип их действия основан на эффекте Холла с использованием дифференциальных магнитных маркеров.

Требование равномерности развертки изображения выполняется жесткой привязкой положения зеркала, материализованного сигналами интерферометрического датчика зеркала и датчиками начала и конца скана, к сигналам опроса ВЗН ячеек ФПУ.

Описание конструкции сканера

Расположение сканирующего зеркала вблизи входного зрачка объектива обеспечивает минимальные массогабаритные характеристики сканера. Минимальные габариты сканирующего зеркала определяются минимальным размером входного зрачка объектива, обеспечивающего необходимое пространственное разрешение, отношение сигнал/шум и поле зрения.

Для разрабатываемого сканера была выбрана функциональная схема, которая включает сканирующее зеркало и маховик, закрепленные на двух коллинеарных осях и имеющие общий неподвижный корпус (рис. 4). Зеркало и маховик оснащены силовыми двигателями и датчиками положения для управления их угловым перемещением. Между зеркалом и маховиком находится рекуператор энергии импульса. Здесь $YZOX$ – система координат в

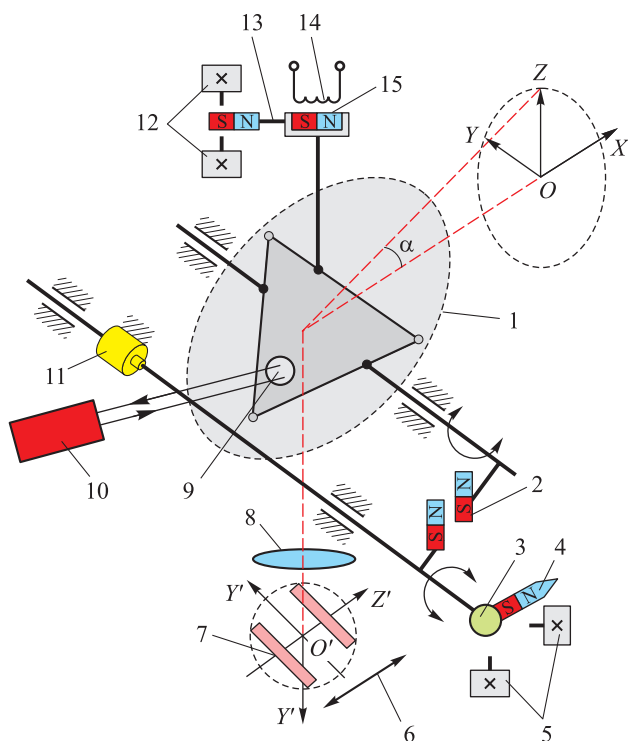


Рис. 4. Функциональная схема сканера:

XYZ – координаты в пространстве предметов;
 $X'Y'Z'$ – координаты в пространстве изображений на ФПУ;

- 1 – сканирующее зеркало в оправе с креплением по трем точкам; 2 – магнитные рекуператоры;
- 3 – маховик, оснащенный инкрементным датчиком положения; 4 – концевые метки датчика маховика;
- 5 – неподвижная часть концевых меток маховика;
- 6 – направление сканирования; 7 – линейки ФПУ;
- 8 – объектив; 9 – отражательные элементы датчика зеркала; 10 – интерферометрический датчик углового положения зеркала; 11 – двигатель маховика;
- 12 – неподвижная часть концевых меток зеркала;
- 13 – концевые метки датчика начала и конца скана зеркала; 14 – неподвижная часть двигателя зеркала;
- 15 – подвижная часть двигателя зеркала

плоскости наблюдения (поверхность Земли), в которой ось X является визирной осью КА, сканирование происходит вокруг оси Y , а $Y'Z'O'X'$ – система координат в плоскости изображения. Аналогичное устройство сканирования описано в статьях [5, 6].

Сканер включает в себя неподвижный корпус и зеркало 1 в оправе, установленной на корпусе посредством подшипникового узла с керамическими подшипниками. Корпус выполнен из термостабильного материала, обеспечивающего стабильное положение зеркала относительно объектива. На нем установлена неподвижная часть 14 двигателя зеркала,

подвижный компенсационный маховик 3, оснащенный инкрементным датчиком положения, бесконтактный инкрементный дифференциальный интерферометрический датчик 10 углового положения зеркала, а также неподвижные части 12 и 5 концевых датчиков зеркала и маховика.

На оси маховика установлен моментный двигатель 11, магнитная система рекуперации 2, а также концевые метки 4 датчика маховика.

Зеркало крепится к оправе на трех точках, на которую устанавливается подвижная часть 15 двигателя зеркала, ответная часть магнитной системы рекуперации 2, концевые метки 13 датчика начала и конца скана зеркала и отражательные элементы 9 интерферометрического датчика положения зеркала.

Отраженные от сканирующего зеркала 1 лучи, проходя объектив, в процессе сканирования перемещаются в пространстве изображений по неподвижным линейкам 7 ФПУ.

Временная диаграмма движения зеркала (рис. 5) содержит участки равномерного движения зеркала, разделенные зонами реверса, в которых вектор скорости зеркала меняется на противоположный.

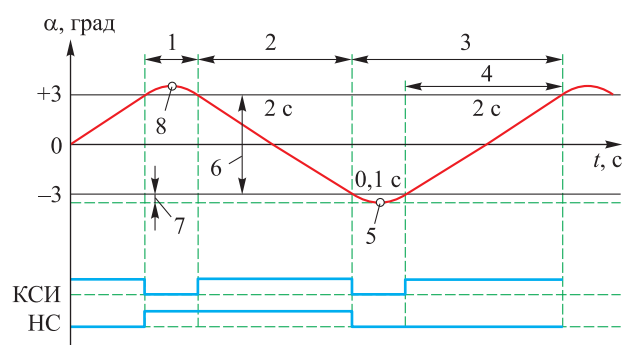


Рис. 5. Временные параметры углов сканирования зеркала с кадровой синхронизацией:

КСИ – кадровый синхроимпульс на ФПУ;
 НС – сигнал направления сканирования

Для стабилизации частоты и обеспечения рабочей температуры лазерного излучателя интерферометрического датчика зеркала в нем используются элементы Пельтье, на которых установлены кристалл лазера и брегговская решетка. Также для исключения переохлаждения на корпусе интерферометрического датчика находится нагревательный элемент.



Количество интерференционных полос определяет угловой период инкремента датчика зеркала, и оно рассчитывается по формуле

$$N = \sin(\alpha_3)2S / \lambda, \quad (4)$$

где S – расстояние между вершинами уголко-вых отражателей (13,5 мм);

λ – длина волны излучения лазера (852 нм).

В результате получаем $N = 3324$ отсчета на $\pm 3^\circ$, при этом один отсчет датчика угла соответствует 6,5 угл. с.

Совмещение сканирования с периодом опроса ФПУ обеспечивается схемой косвенной синхронизации с синтезом программной частоты, период которой кратен отсчету датчика угла и определяется номинальной скоростью сканирования, необходимой для обеспечения режима ВЗН. Сигнал для управления двигателем зеркала формируется фазовым дискриминатором, функциональная схема которого приведена на рис. 6.

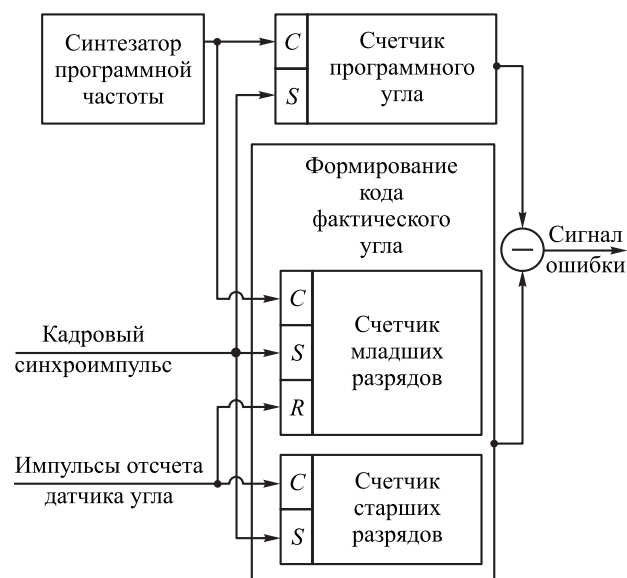


Рис. 6. Функциональная схема фазового дискриминатора

Синтезатор программной частоты формирует импульсы, поступающие на счетчик программного угла с периодом, равным 1/1024 отсчета датчика угла при номинальной скорости сканирования. Сброс счетчика осуществляется кадровым синхроимпульсом, который также направляется на ФПУ. Таким образом, на выходе счетчика программного угла формируется линейно-нарастающий код угла с ценой

деления младшего разряда, равной 1/1024 отсчета датчика угла, т. е. 0,00635 угл. с.

Код фактического угла формируется путем объединения кода счетчиков старших разрядов (отсчеты датчика угла) и младших. Счетчик младших разрядов формирует линейно нарастающий код угла, но сбрасывается в ноль по положительному фронту сигнала отсчета датчика угла.

Сигнал ошибки вычисляется как разность кодов программного и фактического угла с частотой получения отсчета датчика угла при номинальной скорости сканирования. Построенный по такому принципу фазовый дискриминатор определяет отставание или опережение фазы отсчета датчика угла от программного угла и имеет линейную характеристику с разрешением в 0,00635 угл. с, что позволяет уверенно обеспечивать сканирование с СКО погрешности $3\delta \leq 0,5$ и соответственно $\delta \leq 0,17$ угл. с. Диаграмма работы фазового дискриминатора приведена на рис. 7.

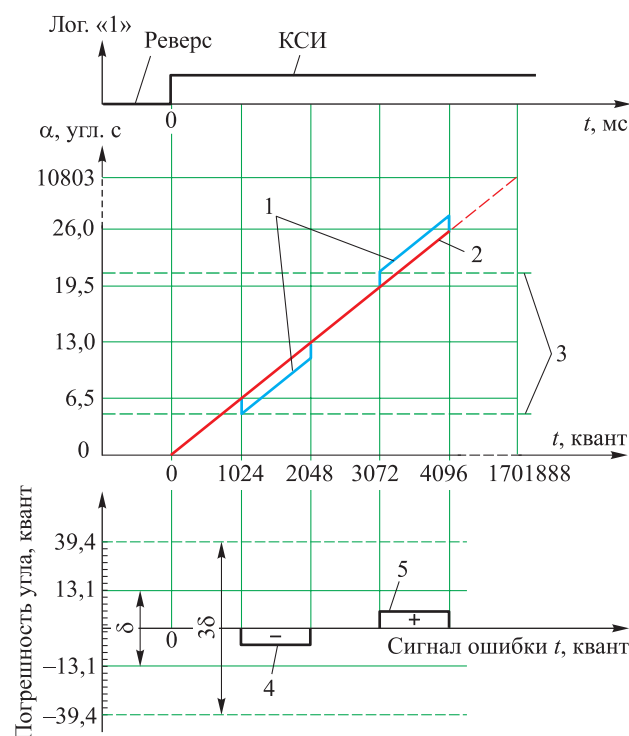


Рис. 7. Диаграмма работы фазового дискриминатора (Лог. «1» – уровень логической единицы.

1 квант ~ 0,00635 угл. с):

- 1 – фактический угол; 2 – программный заданный угол; 3 – фактический отсчет датчика угла;
- 4, 5 – отставание и опережение программного угла в квантах погрешности

Результаты измерений характеристик сканера

В результате измерений были определены следующие характеристики:

Время сканирования, с	2
Время реверса, с	0,1
Диапазон сканирования, град	±3
Количество инкрементов интерферометрического датчика зеркала	3312
Фазовая погрешность сканирования δ, угл. с	≤ 0,17
Потребляемая мощность системы сканирования, Вт	6

В ходе испытаний была измерена крутизна (амплитуды ЭДС Холла от угла) для концевой датчика зеркала с предварительным десятикратным усилением – 0,7 мВ/угл. с (рис. 8).

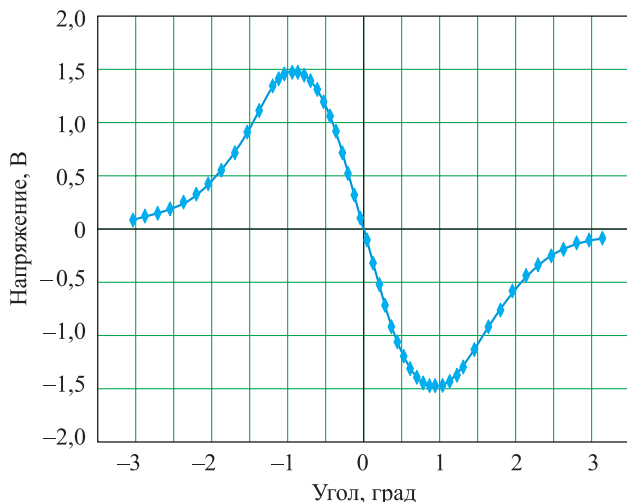


Рис. 8. Характеристика концевой метки зеркала

Также были оценены зависимости момента силы магнитного рекуператора от угла в динамике для сканирующего зеркала (рис. 9). Исходя из отношения кинетической энергии W_3 зеркала и работы A_3 , совершаемой зеркалом:

$$W_3 = J_3 \omega_3^2 / 2; \quad (5)$$

$$A_3 = M \alpha_p; \quad (6)$$

$$A_3 = \int_{\alpha_0}^{\alpha_p} M d\alpha = M(\alpha_p - \alpha_0), \quad (7)$$

где M – момент силы, необходимый для реверса движения зеркала;

α_p – угол реверса зеркала;

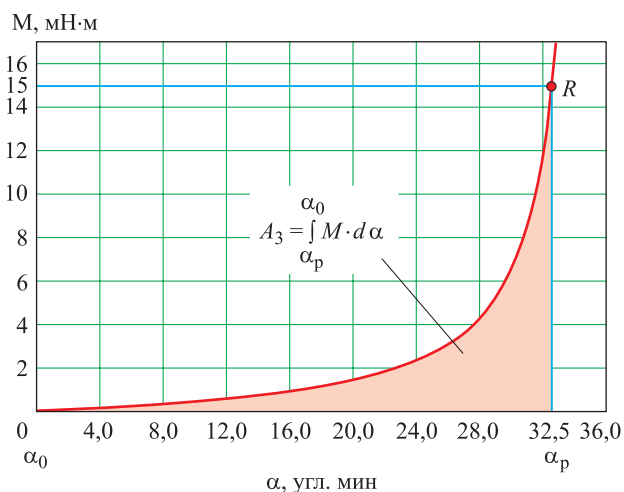


Рис. 9. Зависимость момента силы от угла зеркала в зоне реверса при взаимодействии магнитов рекуператора;
R – точка, в которой происходит реверс движения зеркала

α_0 – начальный угол взаимодействия магнитов рекуператора зеркала;

α – угол взаимодействия магнитов рекуператора зеркала, получаем соотношение

$$J_3 \omega_3^2 / 2 = M(\alpha_p - \alpha_0). \quad (8)$$

Отсюда момент силы реверса

$$M = (J_3 \omega_3^2 / 2) / (\alpha_p - \alpha_0). \quad (9)$$

Заключение

В результате проделанной работы на основе отечественной базы был создан прецизионный однокоординатный сканер космического базирования (рис. 10), сканирующий плоским зеркалом в параллельных лучах пространства предметов с погрешностями сканирования в десятые доли угловой секунды. Получить такие погрешности позволяет созданный интерферометрический датчик определения углового положения зеркала [7], обеспечивающий высокое угловое разрешение в пространстве благодаря стабилизированному когерентному источнику излучения.

После преобразования пространства предметов посредством оптической системы в пространство изображений была произведена синхронная с временными опросами линеек ФПУ развертка пространства изображений, позволяющая получить высокое качество кадра поля обзора.

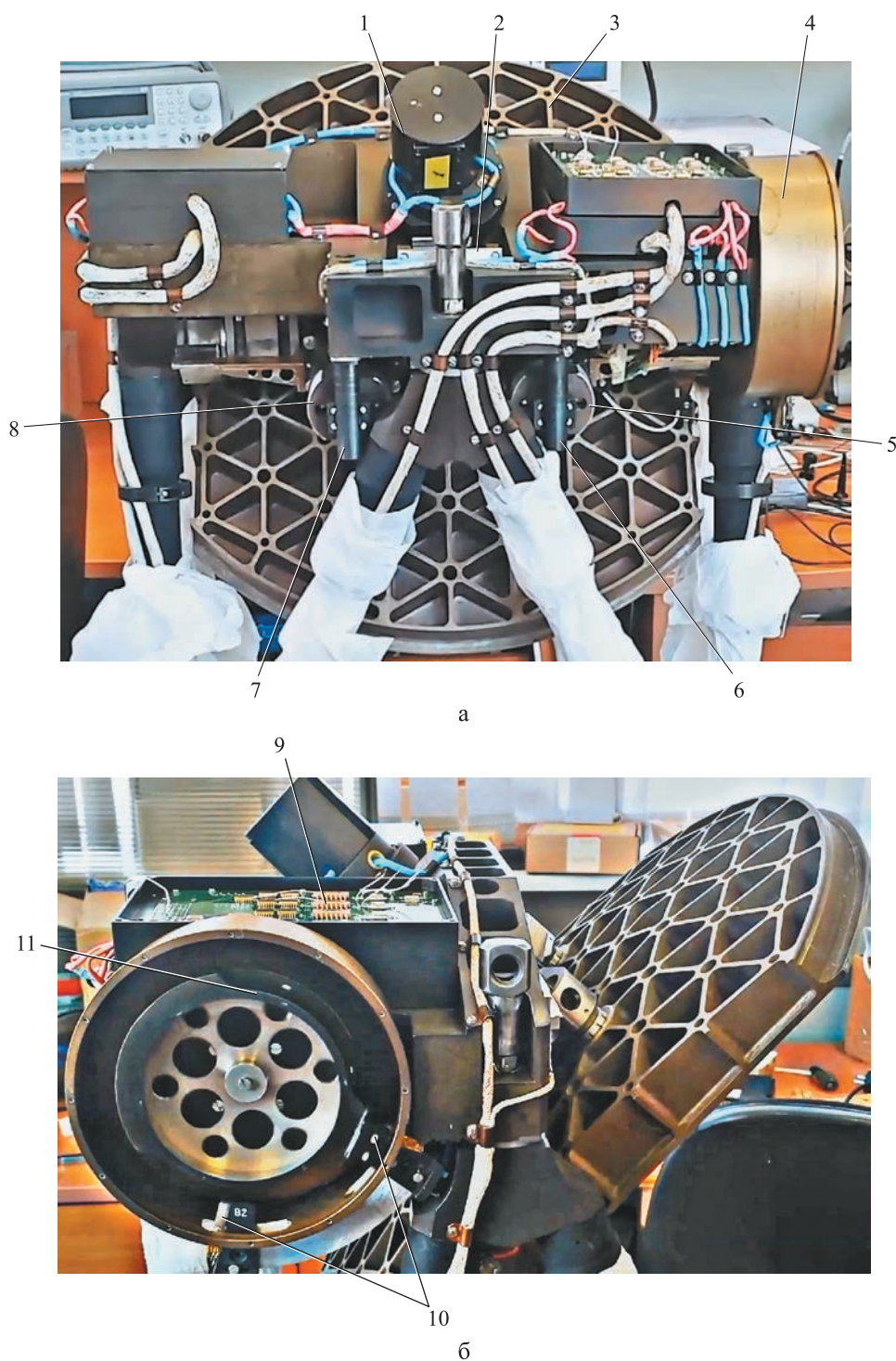


Рис. 10. Вид сзади (а) и сбоку (б) устройства прецизионного однокоординатного сканера космического базирования:

- 1 – датчик зеркала; 2 – рекуператор; 3 – сканирующее зеркало; 4 – маховик; 5 – резервный двигатель зеркала; 6, 7 – метки конца и начала скана зеркала с резервированием; 8 – основной двигатель зеркала; 9 – предварительные усилители датчиков положения; 10 – концевые метки; 11 – датчик маховика

Минимизация механического воздействия на КА от прецизионного однокоординатного сканера космического базирования обеспечивается кинетической компенсацией

сканирующего зеркала специальным маховиком. Сокращение импульсного энергопотребления и времени реверса происходит за счет магнитных рекуператоров.



Список литературы

1. Бочков В. Д., Дрожников Б. Н., Кузнецов П. А., Козлов К. В., Соляков В. Н. Пространственно-временное преобразование информации в многоядных матричных ФПУ // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 1. С. 71–76.
2. Ильин А. «Электро-Л»: три года в строю // Новости космонавтики. 2014. Т. 2. № 03. С. 44–46.
3. Status of the Space Based Infrared System Program // Report to the Defence and Intelligence Committees of the Congress of the United States. March 2005. P. 6.
4. Журавлёва О. В., Иванов А. В., Леонovich А. И., Курносков В. Д., Курносков К. В., Чернов Р. В., Шшиков В. В., Плешанов С. А. Одночастотный лазер с подстройкой длины волны для накачки цезиевых стандартов частоты // Квантовая электроника. 2006. № 38 (8). С. 741–744.
5. Медушев С. В., Ремизов В. Е., Шшиков В. В. Перспективные варианты построения программируемого двухкоординатного привода сканирующего зеркала // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2008. Т. 107. С. 32–37.
6. Вевюрко И. А., Медушев С. В., Ремизов В. Е., Стома С. А. Прецизионный электропривод с интерферометрическим измерителем перемещений и цифровым программным управлением // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 1985. Т. 78. С. 5–33.
7. Вечерковский А. Ф., Егоров П. Э., Милорадов А. Б. Устройство для измерения угловых перемещений объекта. Пат. Российской Федерации № 2601530. Оpubл. 10.11.16, Бюл. 31. 9 с.

Поступила 31.08.16

Вечерковский Александр Федорович – ведущий инженер филиала ОАО «Корпорация «Комета», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: оптика, механика, электромеханика, магнетизм.

Егоров Петр Эдуардович – ведущий инженер-электроник филиала ОАО «Корпорация «Комета», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: электроника, лазерная техника.

Милорадов Алексей Борисович – ведущий инженер-конструктор филиала ОАО «Корпорация «Комета», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: оптика, точная механика, технологии.

Филатов Алексей Борисович – инженер второй категории филиала ОАО «Корпорация «Комета», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: оптика, лазерная техника.

Onboard scanning system for photodetector with time delay and charge accumulation

The study describes scanning space-based assets which, by means of a flat scanning mirror and an optical system, provides the transformation of the object space into a temporal sequence of electronic signals of a photodetector with a time delay and charge accumulation. High accuracy of photodetector elements polling and scanning of the object space is due to the movement of the scanning mirror according to the indications of a non-contact interferometric angle sensor. The reciprocating rotary scanning by a flat mirror is kinetically compensated by the opposite motion of the flywheel, which minimizes residual perturbations on the space platform. To reduce the impulse energy consumption and the time of reversal between the scanning mirror and the compensating flywheel, magnetic reversal energy recuperators are used.

Keywords: scanner, interferometer, mirror, flywheel, recuperator.

Vecherkovskiy Alexandr Fedorovich – Leading Engineer of the branch of Joint stock Company Kometa Corporation, St. Petersburg.

Science research interests: optics, mechanics, electromechanics, magnetism.



Egorov Petr Eduardovich – Leading Electronic Engineer of the branch of Joint Stock Company Kometa Corporation, St. Petersburg.

Science research interests: electronics, laser technology.

Miloradov Aleksey Borisovich – Leading Engineer-constructor of the branch of Joint Stock Company Kometa Corporation, St. Petersburg.

Science research interests: optics, precision mechanics, technology.

Filatov Alexey Borisovich – second rank Engineer of the branch of Joint Stock Company Kometa Corporation, St. Petersburg.

Science research interests: optics, laser technology.