

УДК 621.373.826:621.384.3

Малогабаритная система кругового обзора с компенсатором смаза изображения для инфракрасного диапазона спектра на основе многосегментных оптических клиньев

© 2020 г. **Н. И. Павлов, доктор техн. наук; А. Я. Прилипко;**
А. Н. Старченко, канд. техн. наук

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,
г. Сосновый Бор Ленинградской области

E-mail: pavlovNI@nioer.ru

Поступила в редакцию 01.06.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-11-53-57

Рассматривается система кругового обзора для инфракрасного диапазона спектра на матричном фотоприемном устройстве с небольшим размером входного зрачка, к которой не предъявляются требования многофункциональности и высоких динамических характеристик. Охлаждаемое фотоприемное устройство среднего инфракрасного диапазона с объективом и компенсатором тангенциального смаза изображения размещаются во вращающемся модуле. Командно-информационный обмен обеспечивается вращающимся контактным устройством, установленным по оси вращения подвижного модуля. В компенсаторе тангенциального смаза изображения вместо пары вращающихся одинарных оптических клиньев используются их многосегментные сборки. Показано, что данное техническое решение позволяет в несколько раз увеличить время накопления сигнала относительно базового варианта с односегментными клиньями.

Ключевые слова: инфракрасная система кругового обзора, матричное фотоприемное устройство, компенсатор смаза изображения, оптические клинья, вращающееся контактное устройство.

Коды OCIS: 220.4830, 280.3400, 120.1880

Инфракрасные системы кругового обзора (ИКС КО) представляют собой специализированный класс приборов, предназначенных для получения информации об объектах наблюдения и окружающей обстановке по их собственному тепловому излучению. Обзор в таких системах осуществляется, как правило, в кольцевой зоне, размеры которой по углу места могут составлять десятки градусов. При построении ИКС КО используются разные подходы (см., например [1–4]). Ранее нами был предложен и реализован в виде экспериментального образца вариант сканирующей системы с оптико-механической ком-

пенсацией радиального и тангенциального смазов изображения при неподвижном приемном объективе с матричным фотоприемным устройством (МФПУ) на основе охлаждаемой фокальной матрицы среднего инфракрасного (ИК) диапазона [4–6]. В этом варианте двухкоординатное сканирование пространства обеспечивалось за счет вращения горизонтальной платформы вокруг вертикальной оси и поворота вокруг горизонтальной оси размещенного на ней зеркала (или призмы-куб). Для исключения радиального смаза изображения в схему вводился компенсатор азимутального поворота изображения, который преобразовывал

вращающееся изображение фрагментов контролируемой зоны в неподвижное изображение. Для компенсации тангенциального смаза изображения (и увеличения времени накопления сигнала при экспонировании кадра фотоматрицей фотоприемного устройства) оптическая система дополнялась гармоническим сканатором. Таким сканатором служила пара оптических клиньев, размещаемых на оптической оси системы и вращающихся с одинаковой угловой скоростью в противоположных направлениях. Гармонический сканатор формировал гармоническую составляющую траектории (с частотой, равной кадровой частоте МФПУ), которую совершала оптическая ось при азимутальном сканировании. Амплитуда колебаний оптической оси выбиралась такой, чтобы при экспонировании кадра суммарная скорость азимутального сканирования в плоскости МФПУ была близка к нулю. Временной интервал с ненулевыми скоростями сканирования использовался для считывания накопленных МФПУ сигналов. Описанное исполнение отвечало требованиям многофункциональности ИКС КО (например, исполнению режима сопровождения в круговой зоне группы объектов с быстрым перебором оптической оси с объекта на объект) и реализации высоких динамических характеристик оптико-механических устройств при исполнении криволинейных траекторий сканирования [4, 5].

В настоящей статье рассматривается ИКС КО, имеющая ряд отличий от ранее предложенного исполнения [4, 5]. Речь идет об ИКС КО с небольшим размером входного зрачка (диаметром примерно 20–30 мм), к которой не предъявляются требования многофункциональности и высоких динамических характеристик. В такой системе можно разместить компенсатор тангенциального смаза изображения, приемный объектив и МФПУ во вращающемся модуле, исключив из оптической системы компенсатор азимутального поворота изображения и телескоп переноса плоскости входного зрачка. Полусферический обтекатель из лейкосапфира может быть заменен плоским оптическим окном из просветленного кремния, что дополнительно улучшает суммарное пропускание оптической системы. Командно-информационный обмен обеспечивается применением вращающегося контактного устрой-

ства, установленного по оси вращения подвижного модуля. Новизна технического решения предлагаемой ИКС КО обусловлена использованием компенсатора тангенциального смаза изображения, в котором вместо пары вращающихся одинарных оптических клиньев применяются их многосегментные сборки. Ниже показано, что предлагаемое техническое решение позволяет в несколько раз увеличить время накопления сигнала относительно базового варианта с односегментными клиньями.

Вариант компоновки рассматриваемой ИКС КО представлен на рис. 1.

Основные электронные блоки системы управления и обработки информации, включая формирование матриц коэффициентов коррекции МФПУ, процедур коррекции выходных сигналов, пространственной фильтрации, размещаются в неподвижной части ИКС КО.

В рамках отработки технического решения по компенсатору тангенциального смаза изображения был изготовлен модуль клиньев, состоящий из оптико-механического и электронного узлов. Иллюстрация конструкции оптико-механического узла клиньев, содержащего две однотипные сборки из шести клиньев каждая, синхронно вращающиеся в противоположные стороны с одинаковой скоростью, представлена на рис. 2. Посадочное отверстие в центре вертикальной плиты предназначено для установки объектива при совместной работе с ИК МФПУ. Две оправы, содержащие по шесть клиньев, приводятся в движение электромеханическими приводами, включающими бесколлекторный двигатель постоянного тока ЕС-4 pole 30 типа 309758 и редуктор GP 42 С типа 260551 с коэффициентом понижения 1:6. На задний вал двигателей крепятся датчики угла поворота ЛИР-337А со встроенной муфтой для установки на вал двигателя. Задание скорости вращения клиньев осуществляется управляющим компьютером программным образом по интерфейсному каналу RS-485. По выходным сигналам датчиков угла поворота отслеживаются скорость и синхронность вращения клиньев.

Испытания модуля клиньев подтвердили его работоспособность при различных скоростях вращения выходного вала редуктора, включая номинальное значение 16,7 Гц, или 1000 об/мин.

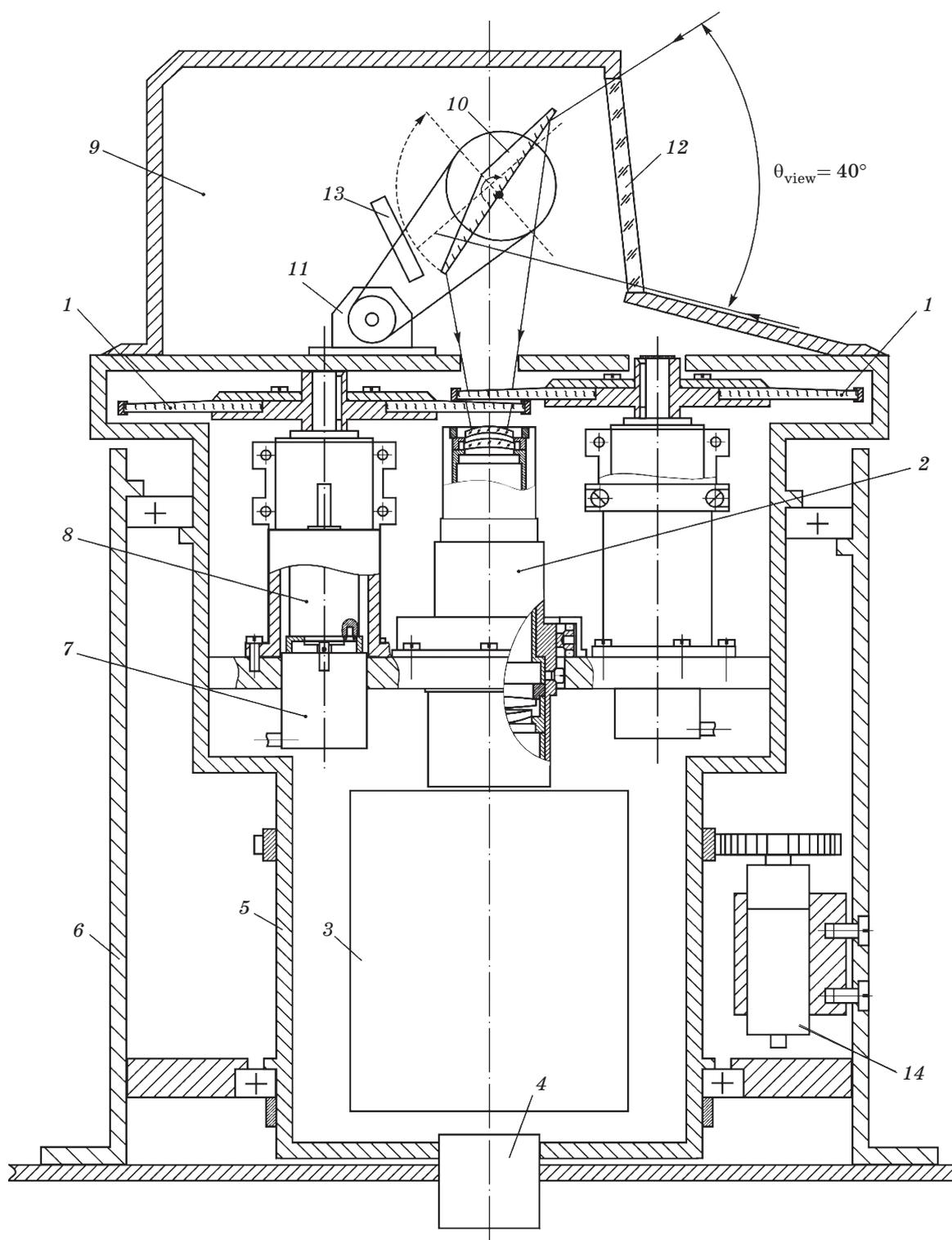


Рис. 1. Оптико-механическая схема ИКС КО. 1 — многосегментные диски с оптическими клиньями, 2 — объектив, 3 — приемный блок на базе охлаждаемого МФПУ среднего ИК диапазона с электронными платами оцифровки сигналов и оптической линией связи, 4 — центральный осевой узел с вращающимся контактным устройством, встроенным в датчик азимутального углового положения вращающегося модуля, 5 — корпус вращающегося модуля, 6 — втулка вращающегося модуля, 7 — энкодер, 8 — электродвигатель, 9 — узел угломестного сканирования, 10 — зеркало угломестного сканирования, 11 — угломестный привод с ленточно-зубчатой передачей, 12 — оптическое окно (кремний с просветлением), 13 — тест-объект калибровки МФПУ, 14 — азимутальный привод.

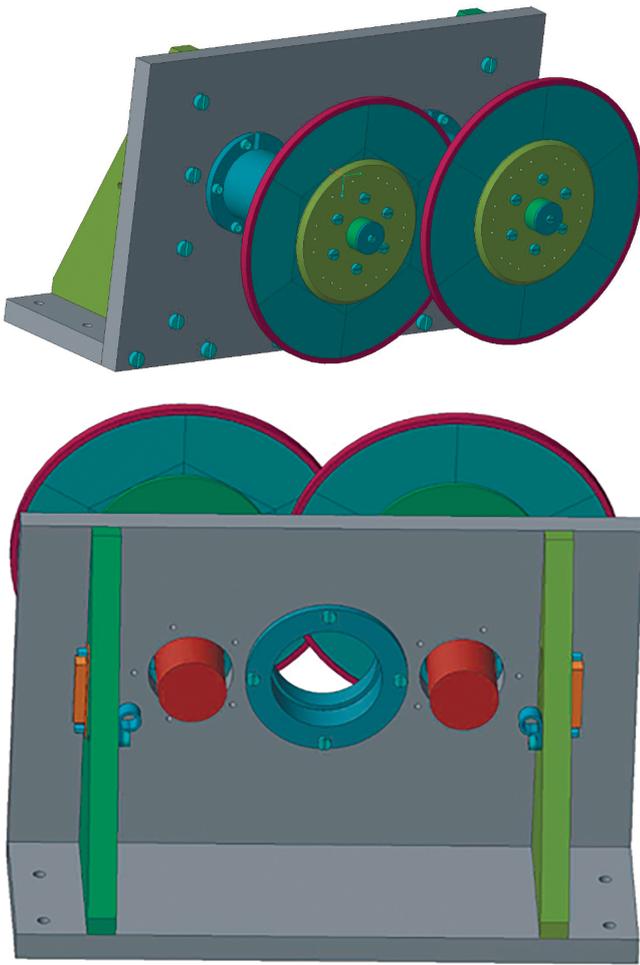


Рис. 2. Конструкция узла клиньев.

Будем полагать, что ИКС КО комплектуется охлаждаемым МФПУ среднего ИК диапазона форматом 640×512 элементов (пикселей) с шагом 15 мкм , кадровой частотой 100 Гц и возможностью работы в режиме IWR (накопление сигнала при считывании). Для оценок, проведенных ниже, считаем, что приемный объектив с фокусным расстоянием 40 мм и относительным отверстием $1:2$ имеет качество, близкое к дифракционному. Основанием для этого служит предварительный расчет шестилинзового объектива с фокусным расстоянием 40 мм на спектральный диапазон $3,7\text{--}4,8 \text{ мкм}$ (основная длина волны $4,2 \text{ мкм}$). Объектив имеет одинаково высокое качество в заявленном угловом поле ($2\omega \approx 17,7^\circ$): диаметр круга, в котором концентрируется 80% энергии параллельного пучка, составляет от 24 мкм на оси пучка до 27 мкм на краю поля. Среднее значение коэффициента пропускания объек-

тива в диапазоне длин волн $3,7\text{--}4,8 \text{ мкм}$ составляет $90,2\%$.

При фокусном расстоянии объектива 40 мм угловой размер пиксела соответствует $\delta\varphi_{\text{pix}} = 0,375 \text{ мрад}$, а рабочий размер кадра $\Delta\varphi_{\text{fr}} \times \Delta\theta_{\text{fr}} = (11,00 \times 13,75)^\circ$. Следовательно для сплошного заполнения круговой зоны шириной по углу места $\theta = 13,75^\circ$ достаточно 33 кадров. Отсюда легко получить оценку длительности цикла обзора T_{view} круговой зоны шириной по углу места, кратной $13,75^\circ$. Длительность цикла обзора T_{view} круговой зоны шириной по углу места $13,75^\circ$ составит $0,48 \text{ с}$, а круговых зон шириной $27,5$ и $41,2^\circ$ — соответственно $0,91$ и $1,26 \text{ с}$. Приведенные оценки учитывают время переброса из зоны в зону, равное $0,1 \text{ с}$, и время на возврат в точку начала обзора, равное $0,15 \text{ с}$ (эти длительности соответствуют значениям, полученным ранее в экспериментальном образце ИКС КО [6]).

Выполним оценку времени накопления сигнала при замене пары одинарных оптических клиньев на их сборки из m сегментов.

Азимутальная развертка $\varphi(t)$, приведенная к плоскости фотоприемной матрицы и определяющая положение оптической оси в момент времени t , удовлетворяет уравнению

$$\varphi(t) = \Delta\varphi_{\text{az}} f_{\text{fr}} t - A \sin\left(\frac{2\pi f_{\text{fr}} t}{m}\right), \quad (1)$$

где $\Delta\varphi_{\text{az}}$ — шаг азимутальной развертки, близкий к размеру кадра $\Delta\varphi_{\text{fr}}$ в азимутальном направлении, f_{fr} — кадровая частота МФПУ, A — амплитуда колебаний оптической оси, m — число сегментов в сборке оптического клина компенсатора тангенциального смаза изображения.

Экспонирование кадра осуществляется во временном интервале, в котором $\varphi(t) \approx 0$. Значение амплитуды A определяется из условия, что за временной интервал накопления сигнала угловое смещение оптической оси (центра пятна рассеяния) $\Delta\varphi$ не превысит половину углового размера пиксела $\delta\varphi_{\text{pix}}$ МФПУ. Не трудно убедиться, что в этом случае выражение для A в формуле (1) имеет следующий вид:

$$A = \frac{\Delta\varphi_{\text{az}}}{2\pi \cos \alpha}, \quad (2)$$

где параметр α является решением уравнения

$$\operatorname{tg}\alpha - \alpha = \frac{\pi}{m} \frac{\delta\varphi_{\text{pix}}}{\Delta\varphi_{\text{az}}}. \quad (3)$$

При числе сегментов $m = 6$, $\delta\varphi_{\text{pix}} = 0,375$ мрад, $\Delta\varphi_{\text{az}} = \Delta\varphi_{\text{fr}} = 11^\circ$ правая часть уравнения (3) равняется $1,02 \times 10^{-3}$. Соответственно численное решение уравнения (3) дает $\alpha = 8,3^\circ$ и $A = 1,8^\circ$. Исходя из полученного значения A для клиновидности σ сегмента клина из кремния при показателе преломления $n = 3,43$ получаем оценку $\sigma = A/(2(n-1)) = 0,37^\circ$.

Оценку времени накопления сигнала t_{exp} получим, используя следующие выражения (см. [4, 5]):

$$t_{\text{exp}} = m\beta/(\pi f_{\text{fr}}), \quad (4)$$

где величина β является решением уравнения

$$\beta - \frac{\sin\beta}{\cos\alpha} = \frac{\pi}{m} \frac{\delta\varphi_{\text{pix}}}{\Delta\varphi_{\text{az}}}. \quad (5)$$

Численное решение уравнения (5) дает значение $\beta = 16,64^\circ = 0,29$ рад. Соответственно время накопления при шестисегментных клиньях составит $t_{\text{exp}} = 0,55T_{\text{fr}}$, где $T_{\text{fr}} = 1/f_{\text{fr}}$. При одинарных оптических клиньях и смещении пятна рассеяния на половину пиксела имеем в качестве оценки времени накопления значение $0,18T_{\text{fr}}$. То есть время накопления при шестисегментных клиньях увеличивает-

ся в 3,05 раза и имеет для кадровой частоты $f_{\text{fr}} = 100$ Гц значение 5,5 мс вместо 1,8 мс при одинарных клиньях.

Следует отметить, что скорость вращения шестисегментных клиньев уменьшается в 6 раз по сравнению с одинарными клиньями. При кадровой частоте МФПУ, составляющей 100 Гц, указанная скорость уменьшается до 16,7 Гц, что является дополнительным положительным результатом.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что реализация предложенных технических решений позволяет значительно улучшить характеристики оптико-электронной системы кругового обзора, работающей в среднем инфракрасном диапазоне спектра. Время накопления сигнала возрастает в несколько раз (в 3,05 раза при замене одинарных оптических клиньев на шестисегментные). Исключение из оптической системы компенсатора поворота изображения и телескопа переноса изображения, а также замена полусферического обтекателя на плоское оптическое окно существенно улучшают ее пропускание (согласно предварительным оценкам примерно в 2 раза). В совокупности указанные решения позволяют рассчитывать на увеличение предельной дальности работы ИКС КО при том же размере входного зрачка не менее чем в 2 раза. Для рассмотренного варианта малогабаритной системы с фокусным расстоянием 40 мм длительность цикла обзора круговой зоны шириной 40° составит примерно 1,3 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прудников Н.В., Шлишевский В.Б. Панорамные оптико-электронные устройства кругового и секторного обзора // Вестник СГУГиТ. 2016. Вып. 1 (33). С. 148–160.
2. Прилипко А.Я., Павлов Н.И. Вариант построения многофункциональной оптико-локационной системы с круговой зоной обзора // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 4. С. 51–56.
3. Nougues P.-O., Baize P., Roland F., et al. Third-generation navalIRST using the step-and-stare architecture // Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XXXIV. 2008. V. 6940. P. 69401B-1–12.
4. Павлов Н.И., Прилипко А.Я. Быстрый обзор круговой зоны инфракрасной сканирующей системой с матричным фотоприемным устройством // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 5. С. 71–75.
5. Борисов М.Ф., Лебедев О.А., Павлов Н.И. и др. Оптико-электронные системы кругового обзора с матричными фотоприемными устройствами // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 9. С. 15–21.
6. Павлов Н.И., Прилипко А.Я. Инфракрасные оптико-локационные системы кругового обзора на базе оптического шарнира: опыт разработки // Сб. тр. XXII междунар. научно-техн. конф. «Радиолокация, навигация и связь». Воронеж, 19–21 апреля 2016. Т. 3. С. 1237–1246.