

УДК 681.785.6

## Устройство функционального контроля сквозного тракта сканирующего оптико-электронного прибора с крупноформатным многоэлементным приёмником излучения

© 2019 г. **В. Н. Васильев\***, канд. техн. наук; **А. С. Гридин\***, канд. техн. наук;  
**И. Ю. Дмитриев\***, доктор техн. наук; **В. В. Синельщиков\*\***; **К. А. Томеев\***

\*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл.

\*\*Корпорация космических систем специального назначения «Комета», Москва

E-mail: [electron@nioer.ru](mailto:electron@nioer.ru)

Поступила в редакцию 14.01.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-08-14-18

---

Разработано бортовое устройство функционального контроля на основе импульсного источника инфракрасного излучения для периодических проверок фотоэлектрических характеристик сквозного тракта оптико-электронных приборов наблюдения. Приведены результаты экспериментальных исследований устройства в составе сканирующего оптико-электронного прибора с крупноформатным многоэлементным фотоприёмным устройством, работающим в режиме временной задержки и накопления.

**Ключевые слова:** оптико-электронный прибор наблюдения, функциональный контроль, импульсный источник излучения, фотоприёмное устройство, режим временной задержки и накопления.

**Коды OCIS:** 120.5630.

---

При эксплуатации оптико-электронных приборов наблюдения (ОЭП) для периодической проверки их работоспособности и контроля сохранности основных фотоэлектрических характеристик сквозного тракта (напряжение фотосигнала, вольтовая чувствительность, энергетическая характеристика напряжения фотосигнала) используются бортовые устройства функционального контроля (УФК). Проведение проверок фотоэлектрических характеристик на этапе эксплуатации ОЭП позволяет своевременно выявить и компенсировать отклонение характеристик от установленных значений, что повышает достоверность получаемых данных и, в конечном счёте, обеспечивает эффективность применения прибора при решении целевых задач.

Известны УФК сквозного тракта ОЭП [1–3], включающие, как правило, стабилизированный источник излучения (модель чёрного тела, светоизмерительную лампу), формирующую оптику и, при необходимости импульсной засветки, электромеханический модулятор, которые выполняют энерге-

тическую засветку фоточувствительных элементов фотоприёмного устройства (ФПУ). К основным недостаткам этих устройств следует отнести ограничения по размеру и равномерности засветки, формируемой в плоскости элементов ФПУ [1, 2], большую инерционность источника и длительность процедур контроля [3].

Особенностями требований к УФК для современных сканирующих ОЭП широкого поля обзора на основе крупноформатных многоэлементных приёмников, работающих в режиме временной задержки и накопления выходного сигнала (ВЗН), является необходимость создания равномерной модулированной малоинерционной засветки фоточувствительных ВЗН каналов ФПУ, обеспечение синхронизации частоты модуляции излучения с частотой опроса каналов, сохранность радиометрических характеристик источника излучения в процессе эксплуатации.

Для обеспечения указанных выше требований на основе предложенного авторами техническое решение [4] было разработано УФК с исполь-

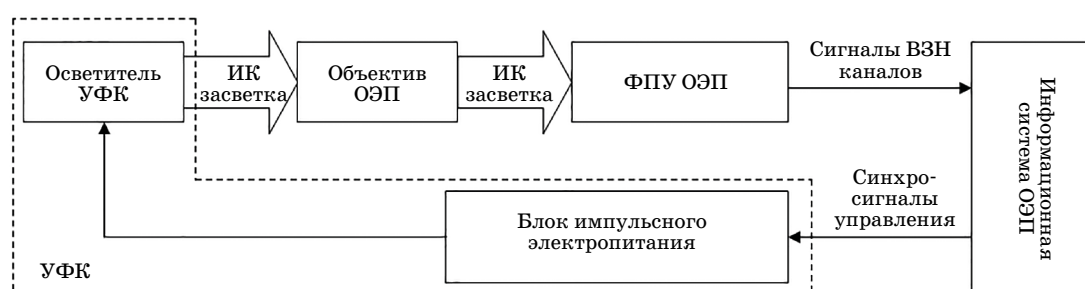


Рис. 1. Функциональная схема УФК ОЭП.

зованием источника импульсной засветки [5]. На рис. 1 представлена функциональная схема УФК для оптико-электронного прибора, предназначенного для регистрации в инфракрасном (ИК) диапазоне сигналов от целевых объектов, контрастирующих с окружающим их фоном. Формирование поля обзора ОЭП выполняется сканирующим устройством на основе плоского зеркала, расположенного перед объективом в параллельном ходе лучей [6].

УФК включает осветитель с источником ИК излучения и блок импульсного электропитания, обеспечивающие формирование засветки ВЗН каналов ФПУ через объектив ОЭП. Такая схема засветки позволяет контролировать фотоэлектрические характеристики всех ВЗН каналов фотоприёмного устройства с учётом пропускания оптических элементов объектива, что в совокупности определяет характеристики сквозного тракта ОЭП. Блок импульсного электропитания УФК определяет амплитуду, длительность и частоту следования импульсов излучения от источника. Синхронизация выдачи импульсов засветки УФК с тактами опроса выходных сигналов ВЗН каналов ФПУ достигается при помощи синхросигналов управления поступающих от информационной системы ОЭП. Информационная система ОЭП выполняет обработку выходных сигналов ВЗН каналов, формируемой засветкой УФК, для определения коэффициентов выравнивания энергетической чувствительности каналов и выявления нерабочих (дефектных) каналов.

На рис. 2 приведена оптическая схема УФК, включающая осветитель УФК с источником ИК излучения и конденсором и объектив ОЭП.

Устройство функционального контроля сквозного тракта ОЭП с многоэлементным приёмником излучения работает следующим образом. Стабилизированный источник ИК излучения 1 (рис. 2) размещают в плоскости полевой диафрагмы 2 конденсора так, что его излучающая поверхность полностью перекрывает площадь полевой диафрагмы конденсора, что обеспечивает полное заполнение рабочей апертуры конденсора излучением от источника. Изображение полевой диафрагмы кон-

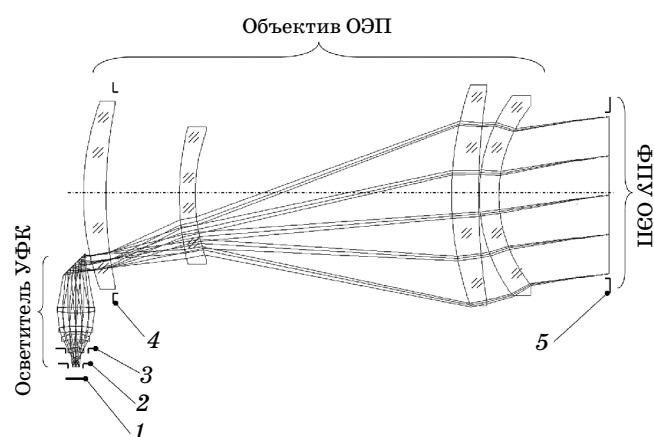


Рис. 2. Оптическая схема УФК. 1 — излучающая поверхность ИК источника, 2 — полевая диафрагма конденсора, 3 — апертурная диафрагма конденсора, 4 — апертурная диафрагма объектива, 5 — полевая диафрагма объектива.

денсора проецируется в плоскость апертурной диафрагмы 4 объектива, что соответствует совмещению изображения излучающей поверхности источника с плоскостью входного зрачка объектива ОЭП. Это обеспечивает независимость равномерности засветки плоскости чувствительных элементов ФПУ от равномерности сформированного конденсором УФК изображения источника, так как каждая точка источника засвечивает всю плоскость чувствительных элементов приёмника излучения.

Для обеспечения минимума паразитного рассеянного излучения и высокой равномерности засветки в поле размещения ВЗН каналов апертурная диафрагма 3 конденсора УФК размещена в передней фокальной плоскости конденсора таким образом, чтобы выходной зрачок оптической системы, состоящей из конденсора УФК и объектива ОЭП, был совмещён с полевой диафрагмой 5 объектива ОЭП. Размер апертурной диафрагмы конденсора УФК выполнен с сохранением подобия формы и размера с коэффициентом подобия  $K = 1/V$ , где  $V$  — увеличение в зрачках оптической системы, состоящей из конденсора УФК и объектива ОЭП.

В составе УФК применён конденсор с коэффициентом подобия  $K = 0,073$ , состоящий из 4-х линз и плоского зеркала, оптимизирующего габариты осветителя УФК. Расчётная оценка распределения облучённости в пределах поля размещения ВЗН каналов ФПУ для оптической схемы из конденсора УФК и объектива ОЭП выполнялась с использованием программных средств оптического конструирования Zemax. Согласно расчёту неравномерность облучённости не превышает 5%.

Выбор источника излучения в осветителе УФК проводился с учётом следующих соображений:

- спектральный диапазон излучения должен совпадать с рабочим спектральным диапазоном чувствительности ОЭП;
- диаграмма направленности излучения близка к Ламбертовскому источнику;
- малая инерционность (малое время нарастания/спада фронта импульсов);
- достаточная мощность излучения;
- низкое энергопотребление.

Тепловые источники излучения по ряду параметров не соответствуют вышеперечисленным требованиям. Для комплектования УФК ОАО «НИИ «Гириконд» был разработан импульсный ИК источник [5], основанный на явлении фотолюминесценции.

Принцип работы фотолюминесцентного источника (ФЛИ) состоит в следующем. Светодиод ближнего ИК диапазона (850–860 нм) облучает фотолюминесцентную пластину, которая переизлучает в средней ИК области в полосе прозрачности атмосферы. В зависимости от параметров пластины длина волны максимума спектрального распределения энергии может варьироваться в диапазоне от 3,0 до 4,1 мкм, ширина спектра излучения — до 0,7 мкм. Режим работы — импульсный, время нарастания / спада импульса — менее 10 мкс, импульсный ток — 2,5 А. ФЛИ прошёл испытания на функционирование в условиях пониженной температуры и давления ( $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{-5}$  мм.рт.ст.). Диаграмма направленности ФЛИ в диапазоне углов от  $0^{\circ}$  до  $45^{\circ}$  от оптической оси соответствует источнику излучения Ламберта. Мощность излучения составляет 10 мВт в импульсном режиме работы. Диаметр излучающей поверхности — 10 мм.

Для сохранения целевой функции ОЭП по сбору информации об объекте наблюдения при проведении процедур функционального контроля с учётом особенностей работы ВЗН каналов в нерабочей зоне цикла сканирования выбран импульсный режим засветки УФК. В данном режиме засветка от УФК формируется в плоскости ВЗН каналов в моменты реверса сканера в виде импульса излучения с заданной длительностью и амплитудой. Начало импульса определяется внешними синхроимпульсами, задающими время начала цикла сканиро-

вания и начало  $i$ -го периода опроса ВЗН каналов ФПУ  $T_{\text{TDI}}$ . Таким образом, достигается временная привязка начала импульса УФК в каждом цикле сканирования с точностью до сотых долей периода опроса. Длительность импульса УФК выбирается в соответствии с длительностью процедуры накопления в ВЗН канале. В дальнейших расчётных оценках принято, что длительность процедуры накопления составляет  $NT_{\text{TDI}}$  (где  $N$  — количество фоточувствительных элементов в составе ВЗН канала).

По результатам исследований предлагается для ОЭП с ограничением рабочей полосы частот электронного тракта выходного сигнала ВЗН канала в области нижних частот выбирать длительность импульса засветки УФК, не превышающей периода опроса ВЗН каналов для устранения эффектов ограничения рабочей полосы частот. В ОЭП без данных ограничений длительность импульса засветки УФК устанавливается не менее длительности процедуры накопления сигнала в ВЗН канале для реализации отсчётов фотосигнала и увеличения отношения сигнал/шум.

На рис. 3 представлены расчётные временные зависимости амплитуды импульса электропитания источника УФК  $U_{\text{imp}}(i)$ , определяющего параметры импульса засветки и соответствующего выходному фотосигналу от элементов ВЗН канала  $U_{\text{FC}}(i)$ , в режимах импульсов излучения УФК с временной длительностью (при  $N = 10$ ).

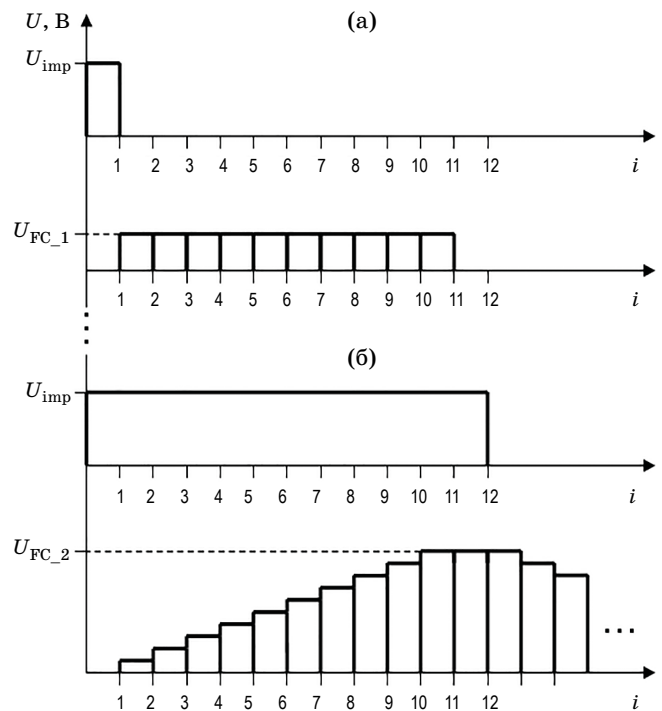


Рис. 3. Временные зависимости импульсов излучения УФК  $U_{\text{imp}}(i)$  и выходного фотосигнала ВЗН канала  $U_{\text{FC}_1}(i)$ ,  $U_{\text{FC}_2}(i)$ .

При длительности импульса засветки, равной длительности периода опроса ВЗН канала  $T_{\text{imp}} = T_{\text{TDI}}$  (рис. 3а), соответствующий засветке выходной сигнал ВЗН канала  $\bar{U}_{\text{FC}_1}$  рассчитывается по формуле (1).

$$\bar{U}_{\text{FC}_1} = 1/N \sum_{i=1}^N U_{\text{FC}}(i), \quad (1)$$

где  $U_{\text{FC}_1}$  —  $i$ -ый отсчёт реализации напряжения выходного фотосигнала ВЗН канала при засветке от УФК.

При длительности импульса засветки, превышающей длительность процедуры накопления в ВЗН канале, выраженной в числе периодов опросов ВЗН канала  $T_{\text{imp}} \geq NT_{\text{TDI}}$  (рис. 3б), соответствующий засветке выходной фотосигнал ВЗН канала  $U_{\text{FK}}$ , рассчитывается по формуле (2).

$$\bar{U}_{\text{FC}_2} = (M - N)^{-1} \sum_{i=N}^M U_{\text{FC}}(i), \quad (2)$$

где  $M = (T_{\text{imp}} - NT_{\text{TDI}})/T_{\text{TDI}}$ .

Отношение  $U_{\text{FC}_2}/U_{\text{FC}_1} = N$  при одинаковой амплитуде импульсов излучения УФК.

Расчёт эффективной облучённости в пределах поля размещения ВЗН каналов ФПУ, создаваемой источником излучения УФК  $E$ , выполняется по формулам (3, 4). Данные формулы применимы для случая, когда яркость источника излучения УФК неизменна в пределах рабочего апертурного угла конденсора.

$$E = \frac{T_{\text{imp}} V_k^2 A_S}{NT_{\text{TDI}} f'^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_S(\lambda) s_{\text{PR}}(\lambda) \tau_{ob}(\lambda) \tau_{\text{cond}}(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

при  $T_{\text{imp}} < NT_{\text{TDI}}$

$$E = \frac{V_k^2 A_S}{f'^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_S(\lambda) s_{\text{PR}}(\lambda) \tau_{ob}(\lambda) \tau_{\text{cond}}(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

при  $T_{\text{imp}} \geq NT_{\text{TDI}}$

где  $V_k$  — увеличение конденсора УФК,  $A_S$  — площадь источника излучения УФК,  $f'$  — фокусное расстояние объектива ОЭП,  $L_S(\lambda)$  — спектральная плотность энергетической яркости источника излучения УФК на длине волны  $\lambda$ ,  $s_{\text{PR}}(\lambda)$  — относительная спектральная характеристика чувствительности ФПУ ОЭП на длине волны  $\lambda$ ,  $\tau_{ob}(\lambda)$  — спектральный коэффициент пропускания объектива ОЭП на длине волны  $\lambda$ ,  $\tau_{\text{cond}}(\lambda)$  — спектральный коэффициент пропускания конденсора УФК на длине волны  $\lambda$ ,  $\lambda_1 \div \lambda_2$  — рабочий диапазон длин волн ФПУ ОЭП.

Экспериментальные исследования предлагаемых способа и средств бортового функционального

контроля выполнялись на образце сканирующего ОЭП с крупноформатным ФПУ ИК диапазона на основе 24 фотомодулей ВЗН каналов формата  $1024 \times 10$  [7]. На рис. 4 приведено изображение объектива ОЭП с установленными основным и резервным осветителями УФК.

На рис. 5 приведено распределение относительной облучённости по полю размещения ВЗН каналов ФПУ, создаваемой засветкой УФК. Данные на рис. 5 подтверждают высокую равномерность распределения облучённости от засветки УФК — отклонение от среднего значения не превышает 3% для полного размера поля размещения ВЗН каналов ФПУ и не превышает 1% для поля размещения

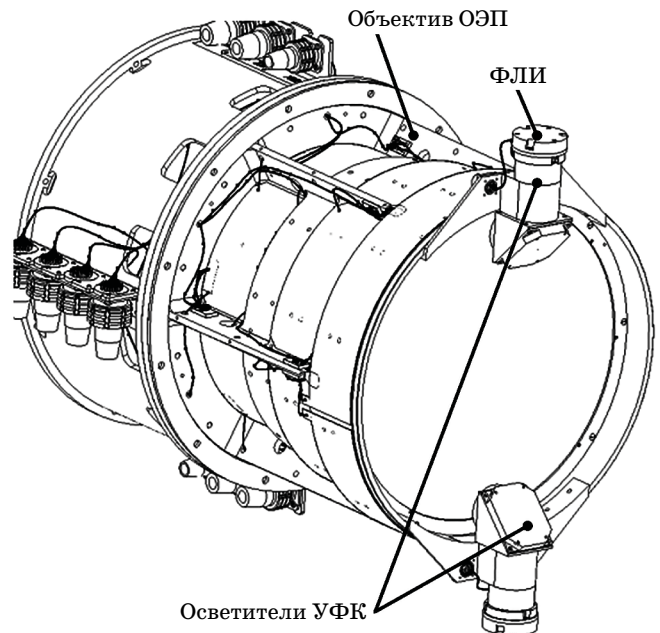


Рис. 4. Объектив ОЭП с установленными осветителями УФК.

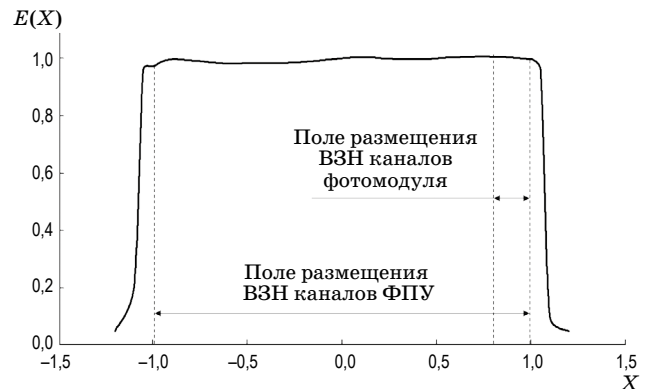


Рис. 5. Распределение относительной облучённости от засветки УФК в поле размещения ВЗН каналов ФПУ  $E(x)$ .  $x$  — координата в поле размещения ВЗН каналов ФПУ, отнесённая к размеру поля.

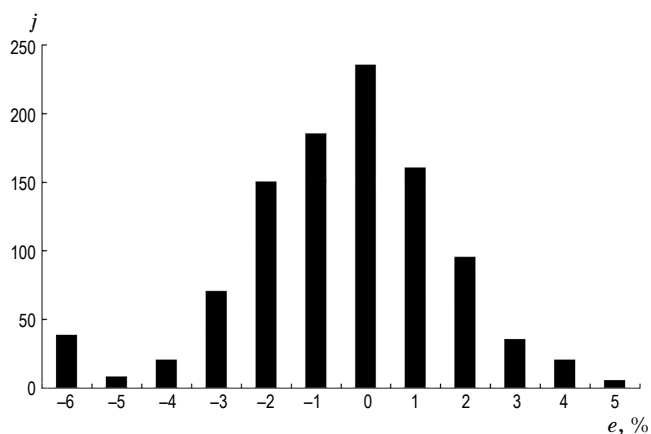


Рис. 6. Гистограмма распределения критерия сравнения фотосигналов для ВЗН каналов фотомодуля  $e(i)$ .

ВЗН каналов одного фотомодуля, что согласуется с расчётными оценками.

На рис. 6 приведены результаты сравнительной оценки фотосигналов  $j$ -ых ВЗН каналов,  $U_{FC}^{imp}(j)$ , полученных при использовании засветки от УФК, с фотосигналами  $U^{ap}(j)$  от засветки «щелевым» излучателем, являющимся широко используемым способом функционального контроля ОЭП [8]. Оценка проводится с использованием критерия  $e(j)$ , определяющего отклонение фотосигналов ВЗН каналов, полученных различными способами. Расчёт критерия выполняется по формуле (5).

$$e(j) = 100 \left[ \left| \frac{U^{ap}(j)}{U^{ap}} \right| / \left| \frac{U_{FC}^{imp}(j)}{U_{FC}^{imp}} \right| - 1 \right], \% \quad (5)$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов А.В., Федоров Б.Ф. Опτικο-электронные приборы космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1972. 229 с.
2. Степанов В.А., Яцык В.С. Четырехканальный сканирующий радиометр РФ-4М // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 10. С. 84–87.
3. Горбунов Г.Г., Лазарев А.И., Малютин В.Н., Джаракаян А.Л. Комплекс обзорно-спектрометрической аппаратуры МФС-Б // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 5. С. 62–68.
4. Васильев В.Н., Гридин А.С., Дмитриев И.Ю., Томеев К.А. Устройство функционального контроля сквозного тракта оптико-электронного прибора с многоэлементным приемником излучения // Патент России № 167849. 2016.
5. Тропина Н., Тропин А. Полупроводниковые источники излучения для инфракрасной области спектра // Компоненты и технологии. 2008. № 11. С. 152–153.
6. Вечерковский А.Ф., Егоров П.Э., Милорадов А.Б., Филатов А.Б. Бортовая система сканирования для фотоприёмника с временной задержкой и накоплением заряда // Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2016. № 4. С. 49–57.
7. Филачев А.М., Бурлаков И.Д., Болтарь К.О. и др. Фотоприёмный модуль формата 1024×10 для приборов космического применения на основе КРТ на область 1–3 мкм // Труды 22 Международной научно-технической конференции по фотозлектронике и приборам ночного видения в ФГУП «НПО «Орион». 2012. С. 22–24.
8. Воронич В.Б., Шаркова Э.В., Яковлева М.П. Сравнительный анализ методов измерения параметров ФПУ с помощью точечного и щелевого излучателей // Известия вузов «Приборостроение». 1992. № 1–2. С. 70–77.

Данные, приведённые на рис. 6, подтверждают совпадение фотосигналов ВЗН каналов, полученных обоими способами. Для 96% ВЗН каналов отклонение не превышает 5%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом проведённой работы стало создание устройства функционального контроля сквозного тракта сканирующего оптико-электронного прибора наблюдения с крупноформатным многоэлементным приёмником излучения. Результаты выполненных исследований созданного устройства показали достоинство предложенных технических решений, в том числе:

- высокую точность оценок разбросов фотоэлектрических характеристик информационных каналов ОЭП вследствие равномерности распределения облучённости от засветки УФК в плоскости элементов ФПУ и низкого уровня рассеянного на элементах конструкции оптико-электронного прибора излучения из-за применяемого способа засветки и ограничения размеров засвечиваемой зоны в плоскости ФПУ;
- высокую оперативность проведения функционального контроля вследствие отсутствия необходимости механического ввода (вывода) оптических элементов, направляющих засветку УФК в сквозной тракт ОЭП и малого времени готовности УФК к формированию засветки;
- возможность синхронизации импульсов засветки УФК с внешними устройствами ОЭП и управления параметрами длительности и амплитуды импульсов засветки в широких диапазонах.