

ПОВЫШЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*Р. С. Кузин, С. А. Анциферов, А. В. Авдошин, И. В. Гостев, А. Ю. Герасимов,
В. А. Мазанов, В. Н. Михалкин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Ограничение видимости различных объектов является важной проблемой, связанной с дальностью видимости. По этой причине создаются различные устройства, приборы и комплексы, позволяющие регистрировать исследуемый объект на дальнем расстоянии. Одним из таких устройств является система лазерного видения.

Принципиальная схема системы на рис. 1. Зондирующий лазер освещает исследуемый объект. Диффузно-отраженное от объекта лазерное излучение (ЛИ) регистрируется матричным фотоприемником (МФ), который передает информацию на ПК.

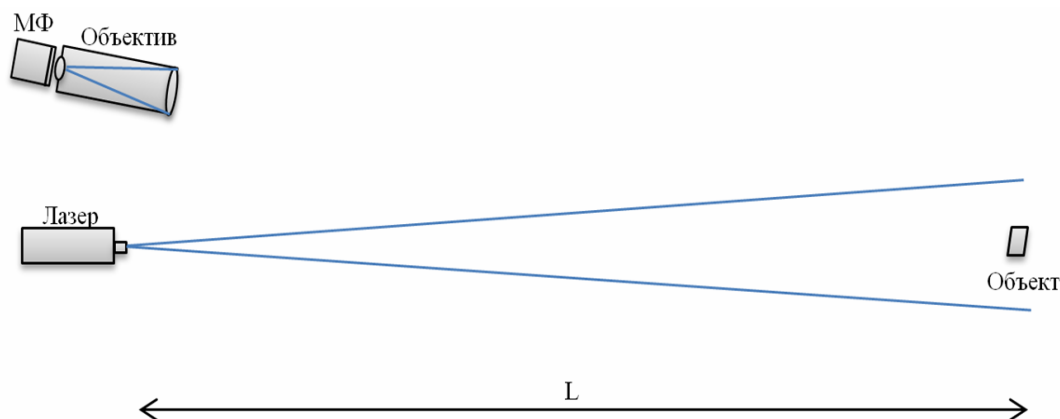


Рис. 1. Принципиальная схема эксперимента: МФ – матричный фотоприемник; L – расстояние до исследуемого объекта

Для оценок возьмем излучение импульсно-периодического лазера подсветки, длиной волны $\lambda = 532$ нм. Объект имеет диффузно-отражающую плоскую поверхность площадью S и коэффициентом отражения материала δ . Отраженный от объекта сигнал принимается объективом и поступает на МФ видеокамеры. При этом на матрице формируется изображение исследуемого объекта.

Факторы, влияющие на дальность видимости объекта

Излучение лазера подсветки направляется на объект помощью оптической системы. На данном этапе излучение теряет свою энергию при распространении через оптическую схему и при прохождении через атмосферу до объекта. Излучение, дошедшее до объекта, частично поглощается им, другая часть диффузно отражается в полусферу (телесный угол $\Omega = 2\pi$). Отраженное от объекта излучение возвращается обратно через атмосферу в приемный объектив, при этом лазерное излучение повторно поглощается атмосферой и оптической схемой. Отметим, что чем больше энергии, отраженной от объекта, мы зафиксируем, тем больше будет дальность видимости.

Выделим основные факторы, влияющие на дальность видимости объекта:

- 1) Энергия (мощность) импульса подсветки ЛИ;
- 2) Апертура приемного объектива;
- 3) Потери в оптическом тракте при прохождении ЛИ;
- 4) Потери в атмосфере при прохождении ЛИ;
- 5) Чувствительность камеры;
- 6) Коэффициент отражения ЛИ от объекта.

В рамках данной работы не рассматривается фактор, связанный с увеличением энергии и мощности импульса ЛИ. Апертура приемного объектива также не может быть увеличена, так как она ограничена динамическими характеристиками системы наведения. Остальные 4 пункта поддаются анализу и экспериментальному исследованию, чему и будет посвящена данная работа.

Определение коэффициента пропускания ЛИ атмосферой

Видимость в атмосфере представляет собой сложное физическое явление, обусловленное, главным образом, ослаблением светового потока частицами воздуха, а также жидкими и твердыми частицами, находящимися в атмосфере во взвешенном состоянии.

Явления ослабления светового потока сильно затрудняют проведение различных экспериментов, имеющих отношение к прохождению излучения через атмосферу, внося систематическую ошибку, зависящую от длины волны распространяющегося излучения, дистанции наблюдения и метеорологических условий.

Ослабление светового потока в атмосфере оказывает большое влияние на дальность видимости различных объектов. В связи с тем, что не существует точной формулы, позволяющей вычислить полное пропускание атмосферы (из-за неоднородности элементов, входящих в нее), была разработана методика измерения метеорологической оптической дальности (МОД), позволяющая получать экспериментальные значения коэффициента пропускания атмосферы в любое время. Под МОД понимается длина пути светового потока в атмосфере, на котором он ослабляется до 5% от своего первоначального значения.

Схема эксперимента по измерению коэффициента пропускания атмосферы представлена на рис. 2. [3]

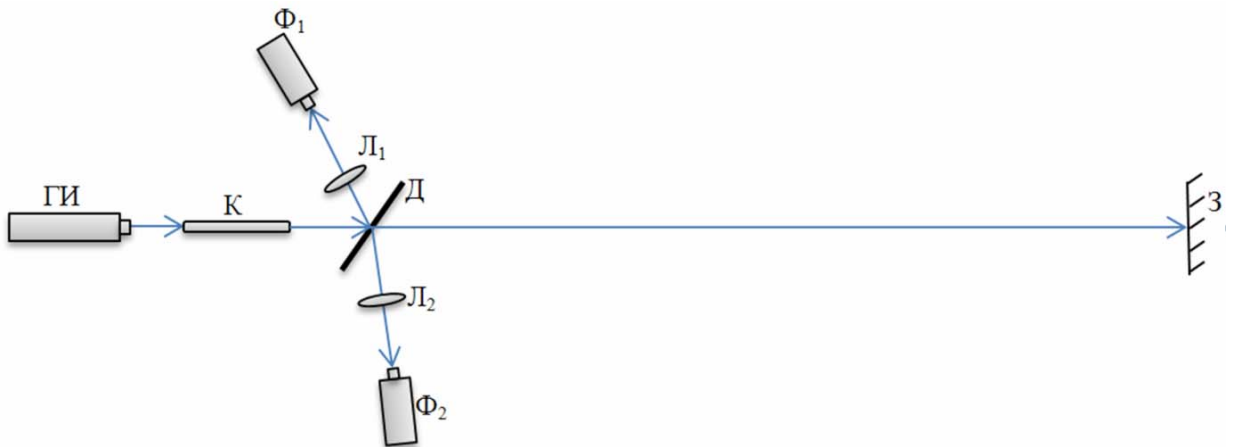


Рис. 2. Схема эксперимента для измерения МОД: ГИ – генератор излучения; К – коллиматор; Л₁ и Л₂ – собирающие линзы; Д – делитель пучка; Ф₁ и Ф₂ – фотоприемники; З – зеркало

Излучение лазера направляется через коллиматор для уширения пучка. Широкий пучок необходим для усреднения помех, таких, как например небольшие участки пыли на оптике или на трассе. Далее, пучок попадает на делитель, что позволяет разделить пучок на 2: один отражается на фотоприемник Ф₁, другой проходит через пластинку Д на трассу, длина которой 100 м. В конце трассы

сы устанавливается зеркало **З**, перпендикулярно пучку. Отраженный от зеркала **З** пучок, возвращается на делитель и отражается от него на фотоприемник Φ_2 , что позволяет зафиксировать приходящий сигнал с учетом потерь на трассе. В итоге на 2-х фотоприемниках получаем сигналы: на Φ_1 опорный сигнал, на Φ_2 – ослабленный на прохождении атмосферы сигнал. Учитывая коэффициент отражения делителя **Д** и зеркала **З**, можем найти отношение сигналов на фотоприемниках. Это отношение, с учетом коэффициентов пропускания и отражения делителя будет показывать, во сколько раз отличаются опорный сигнал и приходящий.

По результатам проведенных экспериментов получены зависимости метеорологической оптической дальности для двух длин волн. Эти графики представлен на рис. 3.

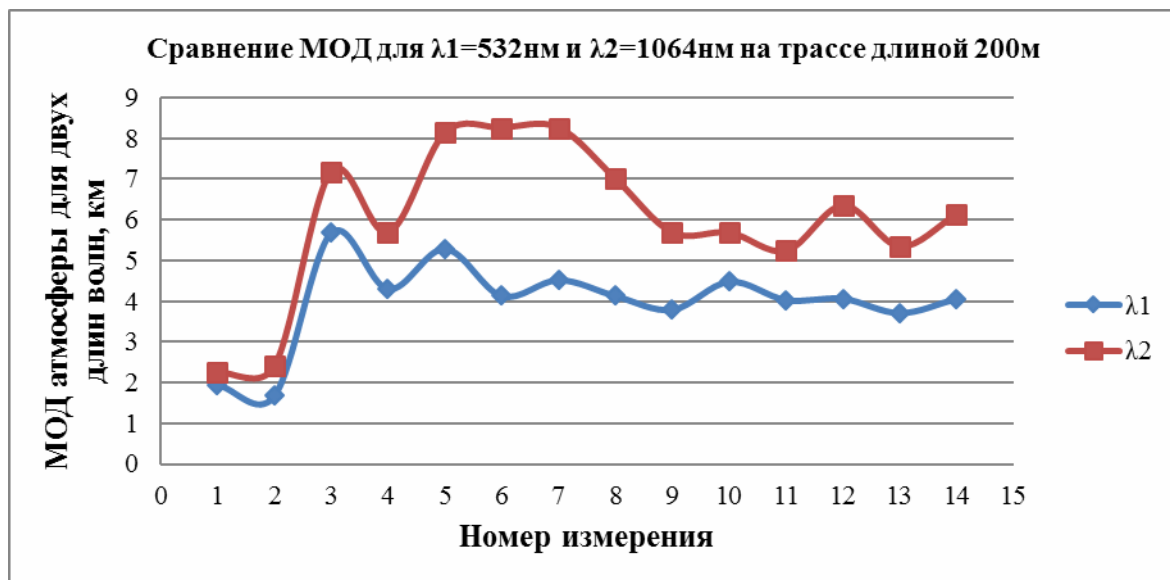


Рис. 3. Сравнение МОД для $\lambda_1 = 532 \text{ нм}$ и $\lambda_2 = 1064 \text{ нм}$ на трассе длиной 200 м

Определение пороговой минимальной чувствительности видеокамеры

Для определения дальности действия системы лазерного видения, необходимо знать чувствительность приемного ФПУ, которое определяется минимальным количеством квантов на пиксель в условиях отсутствия внешнего фона засветки, способная зафиксировать видеокамера с Si матрицей. В качестве источников излучения использовался непрерывный лазер, генерирующий излучение на длине волны 532 нм. Эксперимент проводился в темном помещении с целью исключения внешнего фона засветки. Видеокамера настроена для работы в штатном режиме.

Конфигурация оптической схемы представлена на рис. 4. На матрицу видеокамеры проектировалось увеличенное изображение диафрагмы, подсвеченной лазером.

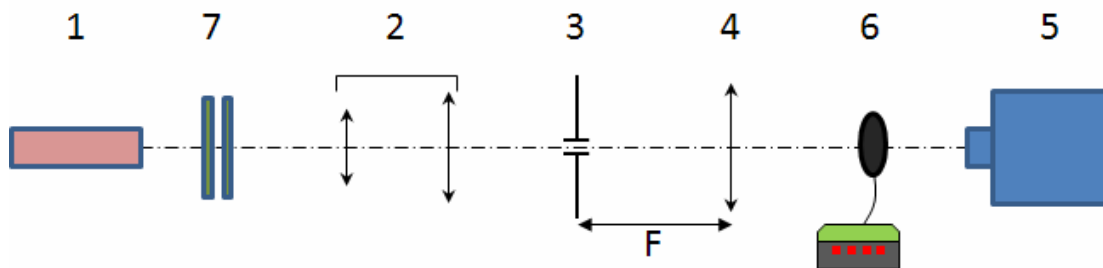


Рис. 4. Оптическая схема эксперимента измерения чувствительности видеокамеры с Si матрицей

Лазерное излучение источника **1** формируется в однородный пучок коллиматором **2**, после чего попадает на диафрагму **3**. Диафрагма **3** находится в фокусе F линзы **4**, которая перестраивает изображение диафрагмы на матрицу видеокамеры **5**. Мощность излучения измеряется перед видеокамерой фотодиодным сенсором фирмы Ophir PD300 **6**. Далее измеритель мощности убирается, и пакетом светофильтров **7** интенсивность лазерного излучения ослабляется до порогового. Выбор данной конфигурации оптической схемы выбран с целью точного определения количества засвеченных пикселей на матрице видеокамеры.

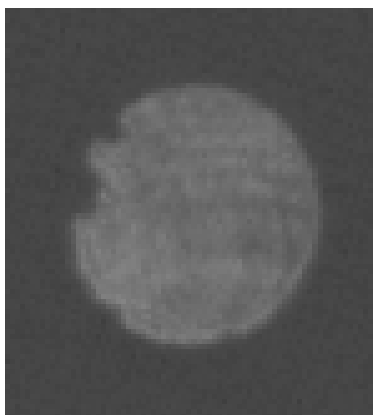


Рис. 5. Изображение диафрагмы на матрице видеокамеры

Энергия излучения вычислялась следующим образом [1]:

$$E_{\text{имп}} = P \cdot t \quad (1)$$

где P – измеренная мощность излучения, t – время экспозиции видеокамеры. Энергия в квантах на пиксель вычислялась по формуле:

$$E_{\text{мин}} = \frac{E_{\text{имп}} \cdot \tau}{E_{\text{кв}} \cdot N} \quad (2)$$

где $E_{\text{кв}}$ – энергия кванта, τ – коэффициент ослабления светофильтрами, N – количество засвеченных пикселей.

Энергия кванта для длины волны 532 нм

$$E_{\text{кв}} = \frac{c}{\lambda \cdot h} \quad (3)$$

где c – скорость света, λ – рабочая длина волны, h – постоянная Планка.

Соотношение сигнал-шум определялось следующим образом. Изображение диафрагмы при пороговой интенсивности излучения с помощью программы Mathcad преобразовывалось в матрицу, где один элемент соответствовал одному пикселю. Далее вычислялось среднее значение элементов по площади соответствующее для засвеченного (U_c) и не засвеченного ($U_{\text{ш}}$) участков (см. рис. 6).

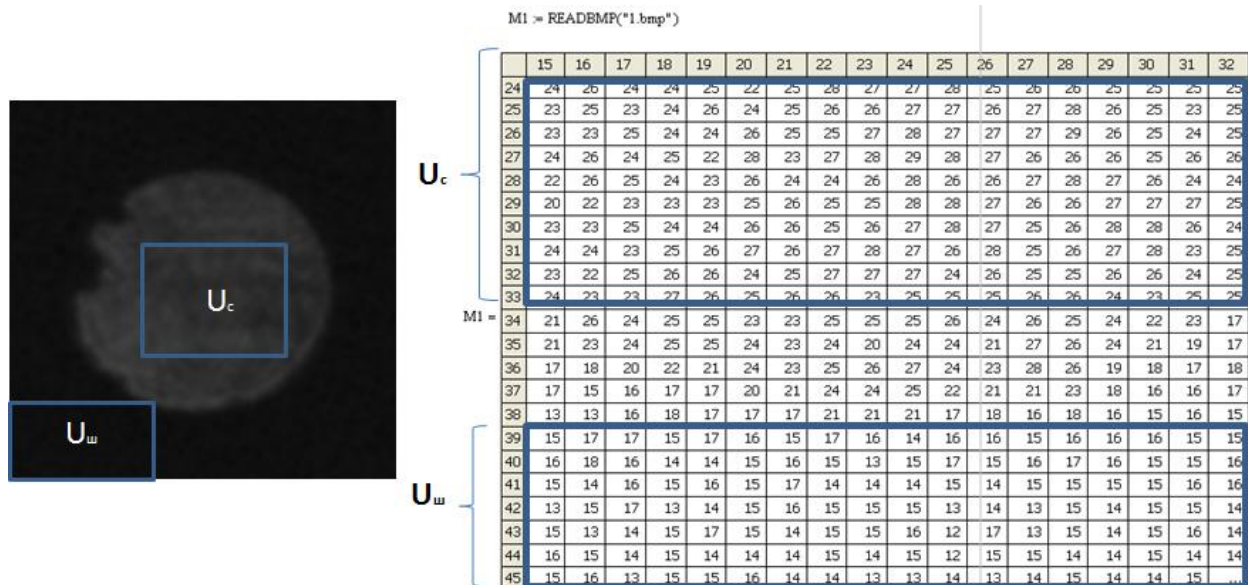


Рис. 6. Пример определения $\frac{U_c}{U_{ш}}$

После анализа результатов эксперимента получены следующие результаты для отношения сигнал-фон $\frac{U_c}{U_{ш}} = 1,2$.

Результат данного эксперимента: пороговая чувствительность видеокamеры составляет 500 квантов на пиксель на длине волны 532 нм.

Таким образом, имея данные о потерях излучения в атмосфере и оптике, зная параметры лазерного излучения и параметры приемного объектива можно рассчитать дальность действия системы по формуле:

$$E = \frac{T \cdot \delta \cdot E_0 \cdot \tau^2 \cdot S_{об} \cdot d^2}{\theta^2 \cdot L^2 \cdot \pi^2 \cdot F^2} \quad (4)$$

где E – энергия излучения; T – коэффициент потерь в оптической схеме; δ – коэффициент диффузного отражения излучения от объекта; E_0 – чувствительность МФ в пересчете на энергию; τ – коэффициент пропускания атмосферы на 1 км; $S_{об}$ – площадь приемного объектива; d – размер пикселя камеры; θ – расходимость пучка; L – дальность видимости объекта; F – фокусное расстояние приемного объектива.

Выразив дальность из формулы (4), находим, что для существующих параметров системы дальность видимости составляет 3500 метров.

Применение электронно-оптического преобразователя для повышения дальности видения

Чувствительность ФПУ можно значительно увеличить при помощи электронно-оптического преобразователя (ЭОП), предназначенного для усиления яркости и преобразования невидимого глазом изображения в видимое.

В ЭОП невидимое (слабоосвещенное) для человеческого глаза изображение местности или объектов наблюдения на входе прибора многократно усиливается и преобразуется в видимое изображение на его выходе.

На рис. 7 представлена схема фотоприемного устройства, включающего в себя электронно-оптический преобразователь, объектив и видеокамеру.

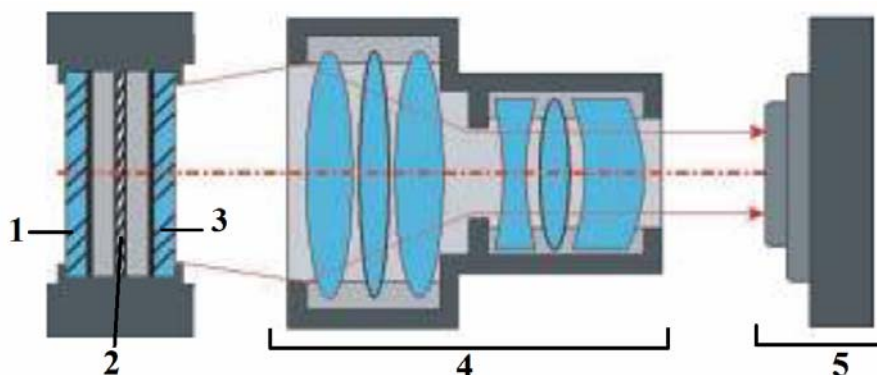


Рис. 7. Схема ФПУ, состоящего из ЭОП, объектива и видеокамеры: 1 – фотокатод; 2 – люминесцентный экран; 3 – микроканальная пластина; 4 – объектив; 5 – камера

Излучение, попадая на фотокатод, посредством фотоэффекта выбивает из него электроны. Далее электроны поступают на микроканальную пластинку (за счет ускоряющей разности потенциалов между фотокатодом и экраном). В микроканальной пластине происходит лавинообразное усиление. После микроканальной пластины электроны поступают на люминесцентный экран, где в свою очередь происходит преобразование электронов в кванты света. С помощью объектива переобрабатывается изображение с экрана ЭОП на матрицу видеокамеры.

На рис. 8 представлен принцип умножения электронов в микроканальной пластине ЭОП.

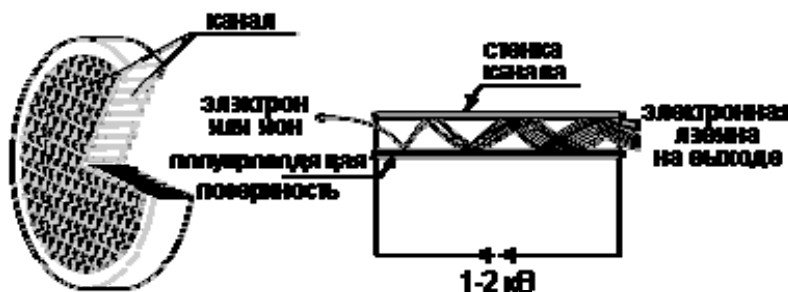


Рис. 8. Принцип работы микроканальной пластины

Измерение пороговой чувствительности ФПУ (ЭОП+видеокамера)

На рис. 9 представлена схема измерения пороговой чувствительности ФПУ, состоящего из ЭОП и видеокамеры.

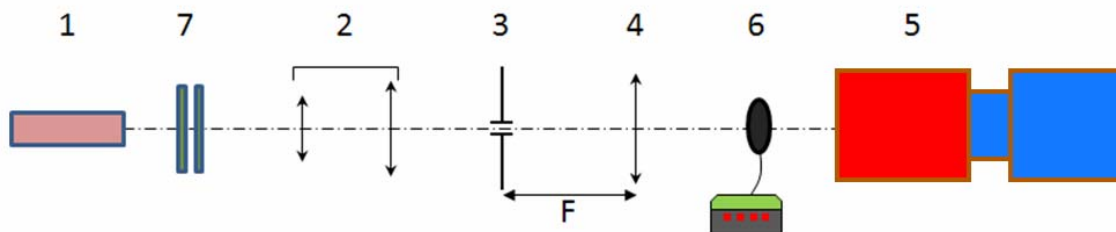


Рис. 9. Схема измерения пороговой чувствительности ФПУ (ЭОП+видеокамера): 1 – источник ЛИ; 2 – коллиматор; 3 – диафрагма; 4 – линза; 5 – матрица видеокамеры; 6 – фотодиодный сенсор Ophir PD300; 7 – пакет светофильтров



Рис. 10. Зависимость количества квантов, приходящих на пиксель камеры от напряжения на ЭОП

Из графика, изображенного на рис. 10, видно, что при пороговом уровне сигнал/шум, увеличивая напряжение на фотокатоде до максимального значения (1000 В), возможно усиление полезного сигнала по отношению к фону больше чем на один порядок. Следовательно, обнаружительная способность камеры совместно с ЭОП составит 8 квантов на пиксель камеры при максимальном напряжении на фотокатоде.

Используя формулу (4) получаем, что применение ЭОП позволяет увеличить дальность действия системы в 3 с лишним раза до 11000 метров.

Внедрение ЭОП в систему лазерного видения

Возможность проведения экспериментов на такой длинной трассе в данный момент отсутствует. Поэтому был создан экспериментальный стенд на базе твердотельного импульсно-периодического неодимового лазера с длиной волны $\lambda = 532$ нм. Излучение лазера формировалось с различной расходимостью и направлялось на объект. Для обнаружения объекта в схеме использовалась оптическая система с матричным ФПУ (ЭОП + видеокамера). На рис. 11 приведена схема эксперимента.

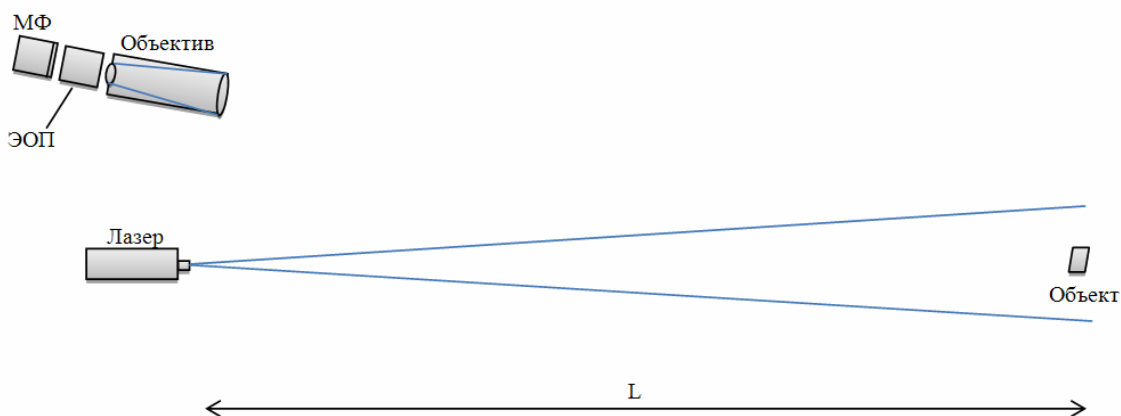


Рис. 11. Схема эксперимента с ФПУ (ЭОП+видеокамера) в системе лазерного видения

В экспериментах проводились измерения в зависимости от яркости излучения, падающего на объект исследований и расходимости лазерного пучка.

Результаты измерения представлены на рис. 12.

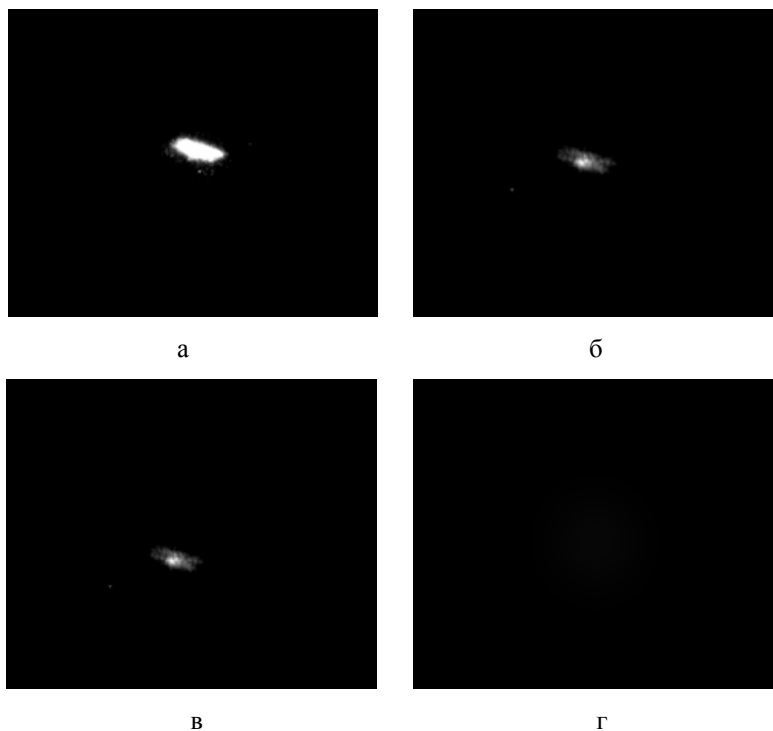


Рис. 12. Результаты измерения: а – изображение на ФПУ (ЭОП+камера) и б – изображение на ФПУ (камера) при одной расходимости лазерного пучка; в – изображение на ФПУ (ЭОП + камера) и г – изображение на ФПУ (камера) при другой расходимости пучка

В случае картинок а и б наблюдается повышенная яркость изображения с использованием ЭОП. Таким образом, из полученных картинок можем сделать вывод, что использование ЭОП увеличивает дальность видения.

Кроме того, из рис. 12 в и г видно, когда яркость освещения не достаточна для регистрации обычной кремниевой матрицы ФПУ, применение ЭОП позволяет регистрировать контрастное изображение объекта.

Выводы

- Проанализированы факторы, влияющие на работу системы лазерного видения.
- Смонтирована схема измерения коэффициента пропускания лазерного излучения атмосферой.
- Анализ полученных данных показал, что для нашей местности характерные величины пропускания для длин волн 532 и 1064 нм составляет 0,86 и 0,9 соответственно.
- Произведена оценка пороговой чувствительности современных матричных ФПУ.
- Показано, что применение ЭОП на основе МКП позволяет в несколько раз увеличить дальность видения.

Список литературы

1. Карасик В. Е., Орлов В. М. Лазерные системы видения: Учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. С. 352, ил.
2. Козинцев В. И., Белов М. Л., Орлов В. М. и др. / Под ред. В. Н. Рождествина. Основы импульсной лазерной локации: Учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. С. 512: ил.
3. Зуев В. Е. Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. М.: Сов. радио, 1966.