

СТЕНД ДЛЯ ОТРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Д. Д. Воеводин, А. В. Добиков, Н. В. Карякин, А. С. Мокеев, А. В. Писецкая, Д. С. Тимаев

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

Введение

В настоящее время лазерные системы передачи информации являются объектом внимания компаний, создающих аппаратуру бортовых систем связи. Преимущества лазерной связи перед радиосвязью заключаются в высокой несущей частоте, что позволяет существенно увеличить полосу пропускания и скорость передачи информации, а также в высокой помехоустойчивости. Кроме этого, отсутствует процедура получения разрешения на использование полос радиочастот. Системы лазерной связи обладают меньшим массогабаритами и энергопотреблением. Использование межспутниковых каналов обмена информацией на основе высокоскоростных лазерных терминалов связи при создании многоспутниковых низкоорбитальных взаимосвязанных систем является особенно актуальной задачей.

Разработка технологии и терминалов системы высокоскоростной космической лазерной связи (ВКЛС) требует проведения целого ряда испытаний, в том числе, и в наземных условиях. Для их проведения необходима разработка стендов как для проверки работоспособности составных частей терминалов и работоспособности терминала в целом, так и для подтверждения основных технических характеристик терминалов. Кроме этого, стенды должны имитировать воздействующие факторы и режимы работы терминала, реализующиеся в условиях его работы в космосе.

При испытаниях необходимо в полном объеме смоделировать как частные режимы работы терминалов («Ориентация терминалов», «Захват/наведение», «Сопровождение»), так и работу терминала при непрерывном автоматическом переходе из одного режима в другой. При проведении испытаний необходимо, чтобы каждый из терминалов излучал и регистрировал лазерные пучки с угловым распределением плотности мощности излучения, соответствующим космическим условиям: на выходе терминалов реальные лазерные пучки, а на входе – лазерные пучки дифракционно-го качества с плотностью мощности излучения, соответствующей заданным расстояниям между терминалами в космических условиях. Кроме этого, необходимо воспроизвести реальные (характерные для условий космоса) скорости угловых перемещений лазерных пучков двух терминалов с достижением той точности наведения, которая должна быть реализована в космосе. Необходимо промоделировать факторы, усложняющие реализацию необходимой точности наведения, особенно – микровибрации терминалов, которые приводят к достаточно высокочастотным угловым перемещениям оптических осей лазерных пучков. В испытаниях необходимо подтвердить возможность получения требуемой скорости передачи информации с достижением приемлемой вероятности битовых ошибок (BER). Одной из важнейших целей испытаний является отработка специального программного обеспечения (СПО) для всех режимов работы терминалов и перехода из одного режима в другой.

Описание основных принципов работы стенда

Стенд [1] предназначен для отработки технологии ВКЛС, а также для проверки работоспособности составных частей терминалов и терминала в целом. Он позволяет определить мощность лазерного излучения (ЛИ) терминала, его энергетическую расходимость, состояние и степень поляризации излучения, скорость передачи информации между терминалами, вероятность битовых ошибок, время вступления в связь между терминалами.

Принципиальная оптическая схема стенда для отработки терминалов (Т1, Т2) лазерной связи представлена на рис. 1.

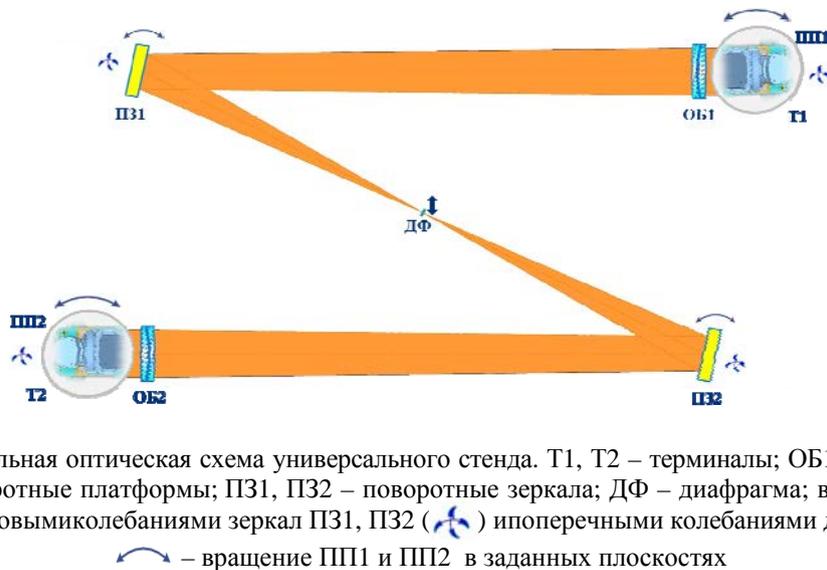


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема универсального стенда. Т1, Т2 – терминалы; ОБ1, ОБ2 – объективы; ПП1, ПП2 – поворотные платформы; ПЗ1, ПЗ2 – поворотные зеркала; ДФ – диафрагма; вибрации терминала моделируются угловыми колебаниями зеркал ПЗ1, ПЗ2 (↺↻) и поперечными колебаниями диафрагмы ДФ (↕); ↻ – вращение ПП1 и ПП2 в заданных плоскостях

Основными оптическими элементами стенда являются два софокусных линзовых объектива (ОБ1, ОБ2) с входной апертурой до ~ 300 мм и фокусным расстоянием ~ 10 м, а также подвижная диафрагма (ДФ) радиусом до ~ 12 мкм, установленная в общей фокальной плоскости объективов ОБ1, ОБ2. Между объективами ОБ1 и ОБ2 и диафрагмой ДФ установлены два зеркала (ПЗ1, ПЗ2) с угловыми подвижками. Терминалы Т1 и Т2 установлены на поворотные платформы ПП1 и ПП2. Угловые повороты платформ и поворотных зеркал, а также поперечные перемещения диафрагмы показаны стрелками.

Для определенности, рассмотрим испытания на стенде терминалов, в состав каждого из которых входят два канала приема и передачи ЛИ: информационный лазерный канал (ИНК) с дифракционным качеством излучения (длина волны излучения $\lambda \sim 1,5$ мкм) и служебный лазерный канал (СЛК) с расходимостью излучения 1–3 мрад ($\lambda \sim 0,8$ мкм). СЛК выполняет роль маяка и используется для передачи служебной информации о работе терминалов.

На рис. 2 представлена обобщенная блок-схема стенда.

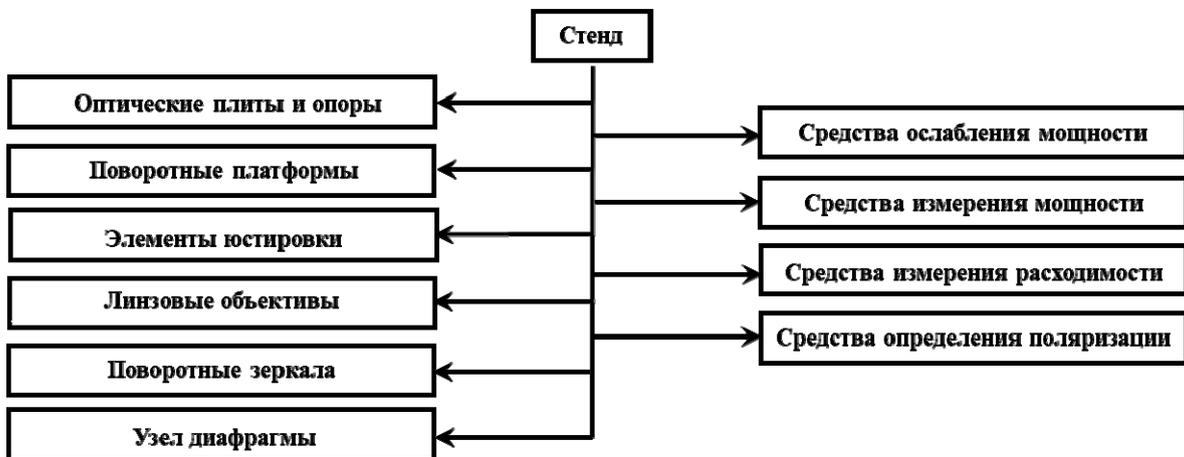


Рис. 2. Обобщенная блок-схема стенда

В состав стенда для обработки высокоскоростной космической лазерной связи входят следующие основные конструктивные элементы: оптические плиты и опоры, поворотные платформы, линзовые объективы, поворотные зеркала, узел диафрагмы, элементы юстировки. Для диагностики ЛИ используются: ослабители мощности, средства измерения мощности и расходимости, а также средства анализа поляризации излучения.

Подвижная диафрагма позволяет воспроизводить реализуемые в космосе точность наведения и угловое распределение интенсивности лазерного пучка на входной апертуре терминала.

Угловые колебания поворотных зеркал и поперечные колебания диафрагмы позволяют моделировать угловые перемещения осей лазерных пучков терминалов (в том числе, и за счет высокочастотных микровибраций терминалов в космосе).

Поворотные платформы позволяют воспроизводить реализуемые в космосе угловые движения терминалов друг относительно друга.

На рис. 3 изображена схема распространения лазерного излучения терминала в космосе.

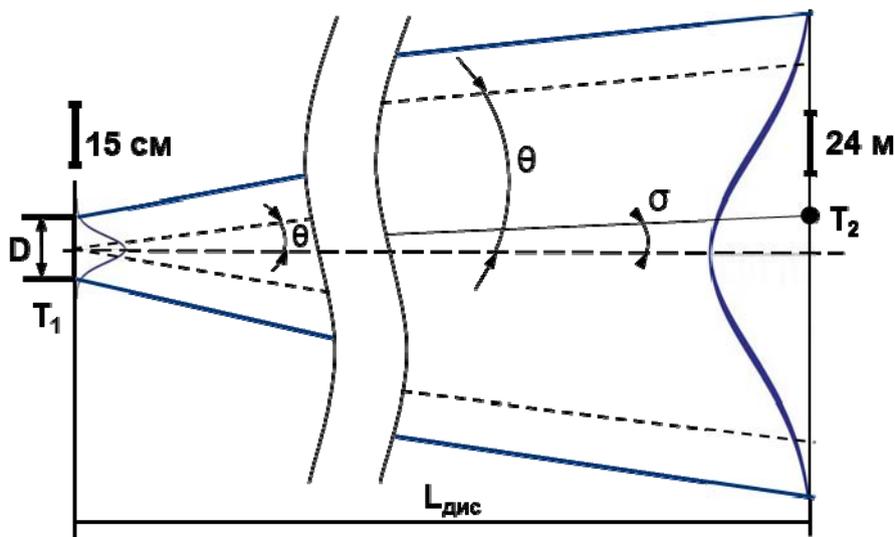


Рис. 3. Распространение лазерного излучения терминала в космосе.  – интенсивность излучения (отн. ед.) по радиусу пучка в характерных областях; D – диаметр выходной апертуры терминала ($D = 15$ см); T_1, T_2 – терминалы; θ – расходимость излучения ИНК ($\theta \sim 10$ мкрад); σ – угловая ошибка наведения ($\sigma \sim 1,5$ мкрад); $L_{\text{диск}}$ – длина дистанции связи ($L_{\text{диск}} = 10000$ км). В скобках приведены характерные значения параметров

При реализации космической лазерной связи пучок излучения ИНК передающего терминала должен всегда покрывать входную апертуру принимающего терминала T_2 областью максимума распределения плотности мощности лазерного пучка с некоторой средней квадратической угловой ошибкой наведения σ . Для терминалов с апертурой $D = 15$ см характерная расходимость гауссова пучка излучения ИНК составит $\theta \sim 10$ мкрад. Для реализации вероятности битовых ошибок $BER \leq 10^{-6}$ необходимо $\theta/\sigma > 6,5$, отсюда $\sigma \sim 1,5$ мкрад [2]. Для характерной дистанции связи $L_{\text{диск}} = 10000$ км радиус перетяжки гауссова пучка составит $W_{1/e^2} \sim 100$ м. Необходимо отметить, что

при обрезании выходным отверстием терминала лазерного пучка по уровню интенсивности в 5 % из-за дифракции плотность мощности лазерного пучка в максимуме распределения уменьшается в 1,6 раза, а его расходимость по уровню $1/e^2$ увеличивается в 1,24 раза [3]. Расходимость излучения СЛК терминала превышает величину расходимости ИНК в > 100 раз и носит характер отличный от распределения гауссова пучка. В результате радиус пятна излучения на $L_{\text{диск}}$ также увеличивается в сотни раз, что позволяет использовать излучение СЛК в качестве маяка.

Распределение излучения терминала в космосе соответствует дальней зоне распространения ЛИ. На стенде для отработки терминалов лазерной связи необходимо смоделировать эту ситуацию. При фокусировке излучения в фокальной плоскости объектива с фокусным расстоянием F формируется угловое распределение плотности мощности излучения ИНК (СЛК) в относительных единицах эквивалентное распределению в дальней зоне, т. е. распределению пучка излучения ИНК в космосе, тогда:

$$W_{1/e^2}/L_{\text{диск}} = w_{1/e^2}/F \quad (1)$$

где W_{1/e^2} – радиус перетяжки гауссова пучка (по уровню $1/e^2$ интенсивности) на дистанции $L_{\text{дис}}$;

w_{1/e^2} – радиус перетяжки гауссова пучка (по уровню $1/e^2$ интенсивности) в фокальной плоскости объектива; F – фокус объектива стенда.

На рис. 4 изображена схема распространения лазерного излучения терминала на стенде.

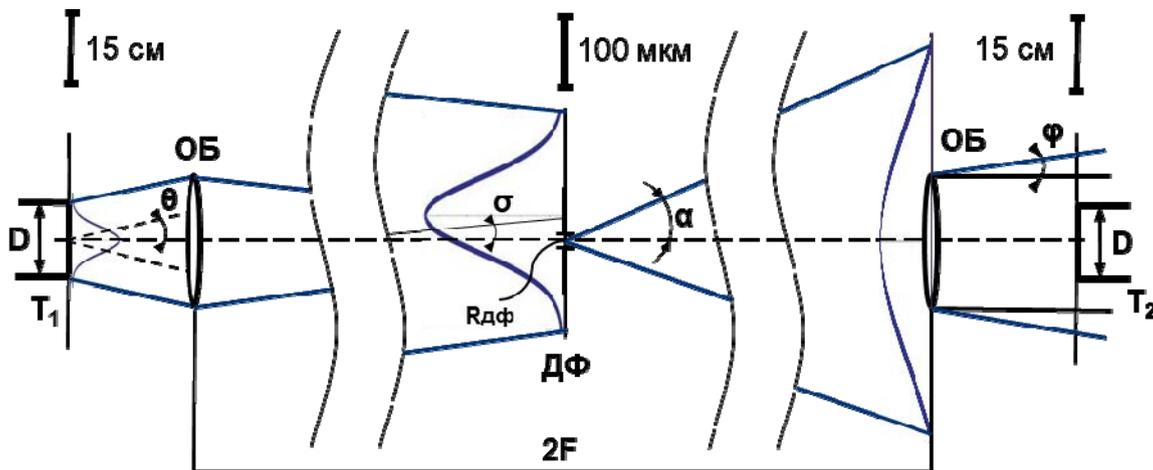


Рис. 4. Распространение лазерного излучения терминала на стенде.  – интенсивность излучения (отн. ед.) по радиусу пучка в характерных областях; T – терминалы; D – диаметр апертуры терминала ($D = 15$ см); ОБ – объектив ($F = 10$ м); ДФ – диафрагма; θ – расходимость излучения ИНК ($\theta \sim 10$ мкрад); w_{1/e^2} – радиусперетяжки гауссова пучка (по уровню $1/e^2$ интенсивности) в фокальной плоскости объектива ($w_{1/e^2} \sim 100$ мкм);

σ – угловая ошибка наведения ($\sigma \sim 1,5$ мкрад); $R_{\text{дф}}$ – диаметр отверстия диафрагмы ($R_{\text{дф}} \sim 6$ мкм); α – угол дифракции на отверстии ($\alpha \sim 9^\circ$); φ – угол дифракции на объективе с $D_{\text{об}} = 0,3$ м ($\varphi \sim 6,1$ мкрад).

В скобках приведены характерные значения параметров

Диафрагма малого радиуса $R_{\text{дф}}$, установленная в фокальной плоскости объектива с фокусным расстоянием F , моделирует угловую область пространства, в которой находятся оба терминала при осуществлении связи с определенной вероятностью битовых ошибок BER. Угловые отклонения оси лазерного пучка от входной апертуры терминала в условиях космоса соответствуют угловым отклонениям оси пучка от центра отверстия диафрагмы. Для излучения ИНК радиус перетяжки в фокальной плоскости объектива с фокусным расстоянием $F = 10$ м составит $w_{1/e^2} \sim 100$ мкм. Пучок

ЛИ, прошедший через диафрагму с отверстием малого радиуса, имеет широкую диаграмму направленности с углом в несколько градусов. Плотность мощности излучения вблизи оси ($\pm 1^\circ$) прошедшего пучка, в первом приближении, определяется плотностью мощности излучения в падающем пучке, в центре отверстия диафрагмы. С уменьшением диаметра диафрагмы точность моделирования относительного распределения плотности мощности ЛИ на входных апертурах терминалов увеличивается. Так, при отношении $R_{\text{дф}}/W_f$ от 0,02 до 0,06, где W_f – радиус перетяжки лазерного пучка в фокальной плоскости объектива, средняя по площади отверстия диафрагмы плотность мощности ЛИ практически совпадает (с точностью до 2 %) с плотностью мощности в центре отверстия диафрагмы. Указанное соответствие выполняется при отклонениях центра отверстия на расстояние до $1,5 \cdot W_f$ от оси пучка в фокальной плоскости объектива.

В качестве примера, на рис. 5 приведена рассчитанная зависимость относительного отклонения интенсивности ЛИ в точке за диафрагмой на оси пучка от смещения этой диафрагмы для трех радиусов диафрагмы и длины волны $\lambda = 1,55$ нм.

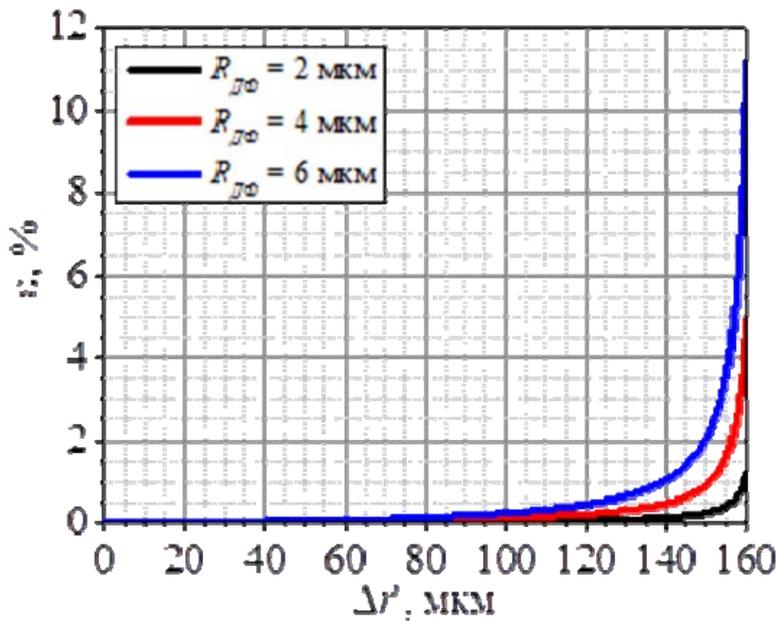


Рис. 5. Зависимость относительного отклонения ε от смещения диафрагмы $\Delta r'$ для трех радиусов диафрагмы = 2, 4, 6 мкм и для длины волны $\lambda = 1,55$ мкм

Лазерный пучок (как ИНК, так и СЛК), который прошёл через диафрагму и который аналогичен падающему на эту диафрагму пучку, попадает на апертуру второго объектива ОБ и выходит из него в виде пучка дифракционного качества, соответствующего апертуре объектива. Далее это излучение еще раз дифрагирует уже на входной апертуре терминала Т2 и фокусируется на входной апертуре приемника терминала Т2 с качеством, близким к дифракционному.

На стенде каждый из терминалов излучает и регистрирует лазерные пучки с угловым распределением плотности мощности излучения, соответствующим космическим условиям: на выходе терминалов – реальные лазерные пучки, а на входе – лазерные пучки дифракционного качества. Для моделирования на стенде характерной для космоса плотности мощностина входной апертуре терминала, необходимо:

$$\frac{P_{\text{вх.стенд}}}{P_{\text{вх.космос}}} = 1 \quad (2)$$

где, $P_{\text{вх.стенд}}$, $P_{\text{вх.космос}}$ – мощности лазерного излучения ИНК на входе терминала-корреспондента на стенде и в космосе соответственно

Соответственно,

$$R_{\text{пз}} \cdot T_{\text{со}} \cdot \frac{\pi^2}{16} \cdot \left(\frac{d_{\text{дф}}}{F}\right)^4 \cdot \left(\frac{L_{\text{дис}}}{\lambda}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

где, $R_{\text{пз}}$ – коэффициент отражения поворотных зеркал на рабочих длинах волн, $T_{\text{со}}$ – коэффициент пропускания оптических элементов стенда на рабочих длинах волн, $d_{\text{дф}}$ – диаметр отверстия диафрагмы, $L_{\text{дис}}$ – длина дистанции связи, F – фокус объектива, λ – длина волны ЛИ.

В связи с поляризационной развязкой передатчика и приёмника ИНК [2, 3], необходимо, чтобы ЛИ, проходящее через диафрагму, не изменяло свою исходную (круговую) поляризацию. Были проведены теоретические расчёты степени деполяризации излучения при прохождении диафрагмы, пример результатов приведён на рис.6.

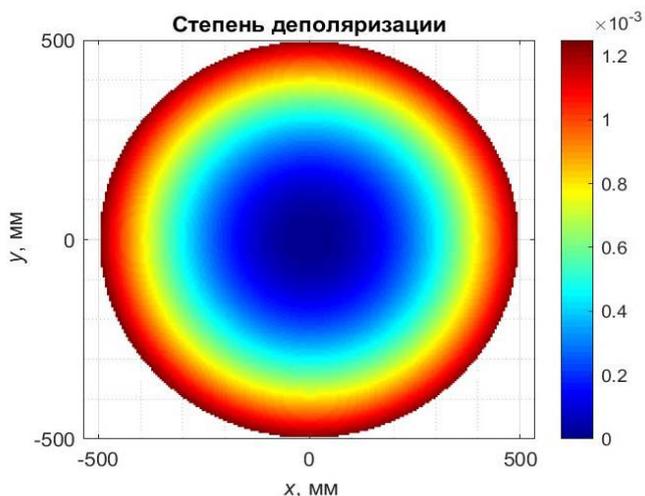


Рис. 6. Степень деполяризации излучения $\varepsilon(x,y)$ при прохождении диафрагмы малого диаметра в плоскости входного объектива для $\lambda = 2 \text{ мкм}$

Степень деполяризации радиально возрастает с увеличением расстояния от оптической оси в плоскости входного объектива и при расстоянии 50 см составляет $\varepsilon \approx 1,2 \cdot 10^{-3}$ (при полном изменении круговой поляризации лазерного излучения на линейную, $\varepsilon \approx 1$). Таким образом, в условиях работы стенда диафрагма малого диаметра ДФ практически не оказывает влияния на исходную круговую поляризацию ЛИ. Максимальное отклонение от исходной круговой поляризации по амплитуде не превышает 0,011 %, а по фазе – 0,0072 %.

Размещение стенда в помещении и проработка основных элементов стенда

На рис. 7 представлен вариант размещения стенда в помещении.

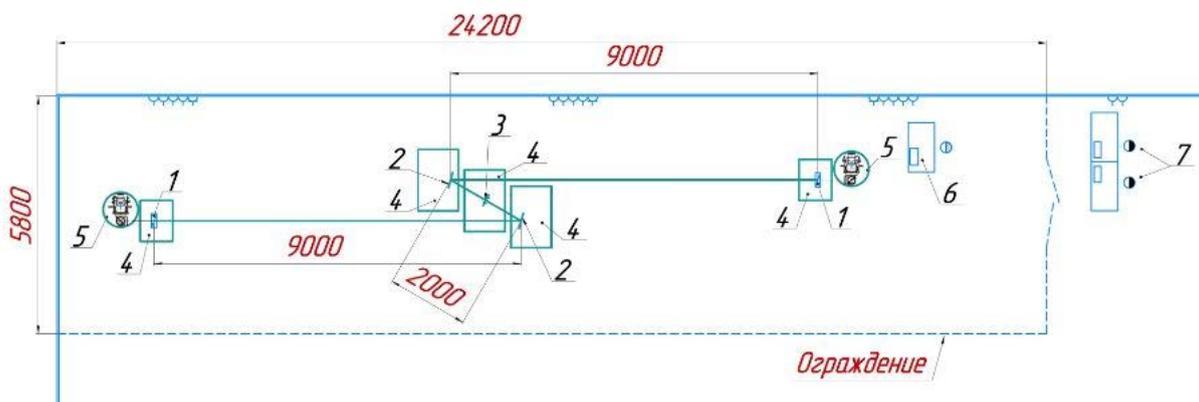


Рис. 7. Схема размещения стенда в помещении: 1 – объектив, 2 – зеркало поворотное, 3 – диафрагма, 4 – столешница оптическая, 5 – платформа поворотная, 6 – система предварительной настройки терминала, 7 – система управления стендом

Данная схема предполагает размещение поворотного зеркала (2) на расстоянии 9 метров от объектива (1). Это выбрано с целью оптимизации светового диаметра поворотного зеркала, исходя из двух критериев: более достоверного моделирования угловых перемещений осей лазерных пучков терминалов и необходимого «запаса» в случае возникновения дополнительных вибраций в помещении.

Узел объектива. На рис. 8 представлена 3D-модель и эскиз двухлинзового объектива, а также рассчитанные лучевые диаграммы пятна рассеяния для двух длин волн.

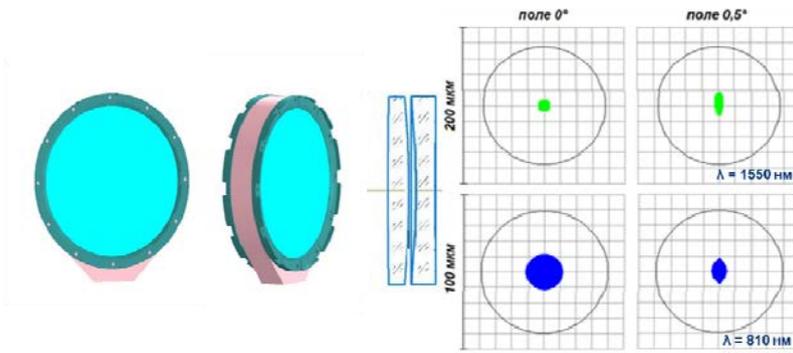


Рис. 8. 3D-модель и эскиз двухлинзового объектива. Лучевые диаграммы пятна рассеяния. Круг в центре – кружок Эйри

Объектив имеет световой диаметр 300 мм (габаритный размер – 310 мм), фокус – 10 м и обеспечивает дифракционное качество пятен фокусировки для длин волн $\lambda = 1550$ нм, $\lambda = 810$ нм в пределах углового поля $2\omega = 1^\circ$. С учётом допусков на изготовление оптических компонентов и их взаимного расположения, размер кружка рассеяния, определенного по уровню 80 % энергии, превышает дифракционное не более, чем в 1,1 раза.

Узел поворотного зеркала. На рис. 9 представлена 3D-модель узла поворотного зеркала с дефлектором.



Рис. 9.3. D-модель узла поворотного зеркала с дефлектором

Узел поворотного зеркала имеет следующие характеристики:

- диапазон линейных перемещений зеркала по x, y: 25 мм;
- разрешающая способность линейных перемещений по x,y: 1,25 мкм;
- диапазон вращения зеркала вокруг оси z: $\pm 90^\circ$;
- разрешающая способность угловых перемещений: 0,6'.

Угловые колебания поворотных зеркал предполагается осуществлять с помощью дефлектора.

Вариант дефлектора имеет характеристики:

- диапазон перемещений: ± 2 мрад.
- резонансная частота с зеркалом ($\varnothing = 50$ мм, $h = 15$ мм, 21 гр.): 1400 ± 20 % кГц.

Диафрагма. На стенде одним из основных элементов стенда является диафрагма, которая позволяет воспроизводить реализуемые в космосе точность наведения и угловое распределение интенсивности лазерного пучка на входной апертуре терминала. Поперечные колебания диафрагмы позволяют моделировать угловые перемещения осей лазерных пучков терминалов. На рис. 10 представлена конструкция диафрагмы.

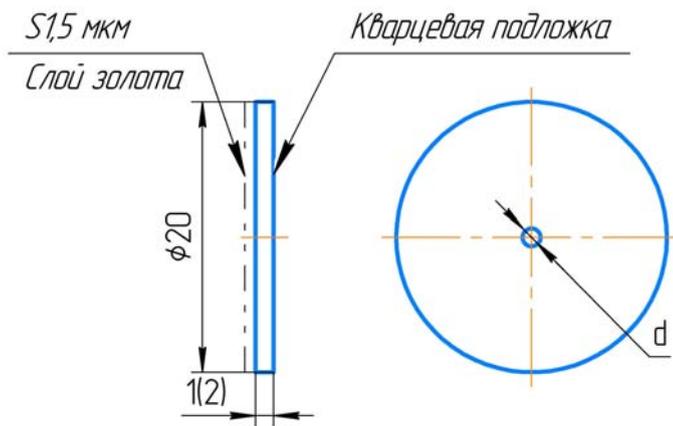


Рис. 10. Эскиз диафрагмы стенда

Диафрагма представляет собой конструкцию, состоящую из плоскопараллельного диска радиусом $r = 20$ мм и толщиной $h = 1$ или 2 мм из кварца с напыленным на поверхность слоем золота толщиной $\delta = 1,5$ мкм. Диаметр отверстия диафрагмы составляет от 4 до 20 мкм.

Результаты теплового расчёта диафрагмы показаны на рис. 11.

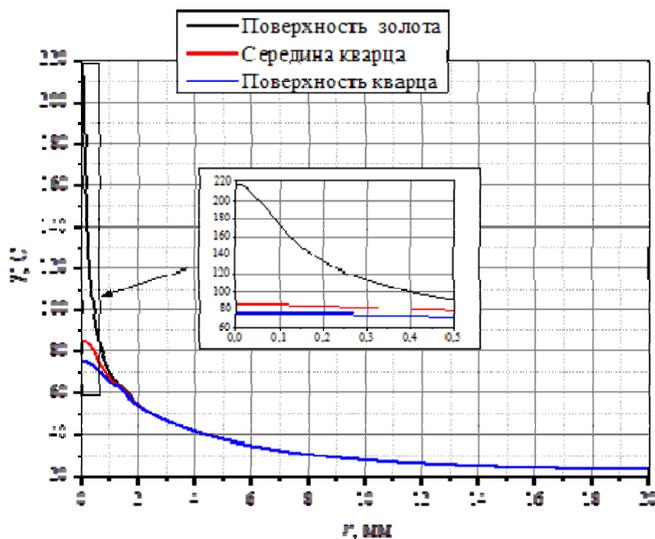


Рис. 11. Распределение температур по радиусу диафрагмы для кварцевой подложки толщиной 1 мм при суммарной падающей мощности лазерного излучения 8 Вт с длиной волны $\lambda = 1,55$ мкм на момент времени 100 с

Расчёты показали, что для характерных мощностей и пятен ЛИ тепловые потоки не приводят к значительному разогреву подложки с диафрагмой малого диаметра. Максимальная температура поверхности золота не превышает 220 °С (температура плавления золота 1064 °С), а кварцевой подложки – 85 °С (температура плавления кварца не менее 1713 °С).

Измерители мощности и расходимости лазерного излучения

Характерные мощности и диаметры пятен ЛИ в фокальной плоскости объектива, а также мощности ЛИ, прошедшего через диафрагму, представлены в табл. 1.

Характерные мощности и диаметры пятен лазерного излучения в фокальной плоскости объектива и лазерного излучения, прошедшего через диафрагму

Местоположение	Длина волны ЛИ, нм	Мощность, Вт	Диаметр пятен, мм
Фокальная плоскость объектива	1550	1,5–4	0,2–0,4
	810	0,1–1	15–22
После диафрагмы	1550	$80 \cdot 10^{-6}$ – $17 \cdot 10^{-3}$	–
	810	$30 \cdot 10^{-10}$ – $13 \cdot 10^{-7}$	–

В табл. 2 представлены модели устройств и основные характеристики измерителей мощности и анализаторов лазерного пучка, которые применяются на стенде.

Таблица 2

Основные характеристики измерителей мощности и анализаторов лазерного пучка

№	Спектральный диапазон, нм	Диапазон измеряемой мощности, Вт	Точность	Размер матрицы, мм ²	Размер пикселя, мкм ²
1	190–20000	$40 \cdot 10^{-3}$ –150	± 3 %	–	–
2	800–1700	$10 \cdot 10^{-12}$ – $200 \cdot 10^{-3}$	± 3 % (1550 нм) ± 5 % (810 нм)	–	–
3	1440–1605	–	± 5 %	7,1×5,3	4,4×4,4
4	190–1100	–	± 2 %	35×24	9,0×9,0

Заключение

Таким образом, представлен и обоснован технический облик стенда для отработки технологии ВКЛС и для проверки работоспособности составных частей терминалов и терминала в целом. На стенде:

- воспроизводятся характерные для условий космоса скорости угловых перемещений лазерных пучков, в том числе, вызванные микровибрациями терминалов;
- реализуется такая же точность наведения и плотность мощности лазерного излучения на входе терминалов, которые соответствуют заданным расстояниям между терминалами ВКЛС при их работе в космических условиях;
- при заданной скорости передачи информации и моделировании заданного расстояния между двумя терминалами подтверждается возможность достижения требуемого уровня вероятности ошибочного приема;
- воспроизводится организация лазерной связи между терминалами, расположенными, как на околоземной орбите, так и между терминалами, расположенными на околоземной и геостационарной орбитах.

Стенд позволяет определить следующие характеристики:

- мощность лазерного излучения (с точностью, не хуже ± 3 %);
- энергетическую расходимость лазерного излучения (с точностью, не хуже ± 5 %);
- состояние и степень поляризации лазерного излучения;
- скорость передачи информации между терминалами и вероятность битовой ошибки BER при моделировании необходимой дальности действия связи до 45000 км;
- время вхождения в связь между двумя терминалами.

Список литературы

1. Буйко С. А., Воеводин Д. Д., Гаранин С. Г., Григорович С. В., Лажинцев Б. В., Мокеев А. С., Писецкая А. В., Ройз И. М., Стародубцев В. А. Заявка на изобретение № 2022110474, 18.04.2022.
2. Near-Earth Laser Communications second edition, Edited by Hamid Hemmati. – 2021. – с. 453.
3. Hu, Yuan, et al. «Optimum design of Cassegrain antenna for space laser communication». Optical Communication, Optical Fiber Sensors, and Optical Memories for Big Data Storage. – Vol. 10158. SPIE, – 2016.