

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

doi: 10.51639/2713-0568\_2022\_2\_3\_9

УДК 535.2

ГРНТИ 49.46.33

ВАК 01.04.05

### Конструирование атермальных оптических систем для беспроводной лазерной связи

\* Баскакова А. В., Кузнецов С. Н., Широбакин С. Е.

*Акционерное общество «Мостком», Рязань, Урицкого, 35, помещение Н7*

e-mail: [info@mocckom.ru](mailto:info@mocckom.ru), \* [anna\\_bas97@mail.ru](mailto:anna_bas97@mail.ru)

Возможности FSO оборудования определяются качеством оптической системы и стабильностью ее параметров при воздействии внешних факторов, важнейшим из которых является температура. В работе представлена методика оценки термостабильности оптических систем, которая позволяет оценить влияние температуры на бюджет оптической линии связи.

*Ключевые слова:* беспроводная оптическая связь, оптическая система, атермальность, бюджет.

### Введение

Одной из все более востребованных в настоящее время технологий беспроводной высокоскоростной телекоммуникации является технология атмосферных оптических линии связи (АОЛС, Free Space Optics, FSO-оборудование). Данный вид связи, использующий модулированное лазерное излучение, имея свои ограничения в применении из-за воздействия внешних факторов таких как снег и туман, тем не менее очень перспективен благодаря скорости передачи данных, соизмеримой с передачей по оптическому волокну. В данном оборудовании запас по усилению (бюджет) линии связи определяется расходимостью излучения в открытом пространстве. В связи с этим возможности FSO оборудования определяются качеством оптической системы и стабильностью ее параметров при воздействии внешних факторов, важнейшим из которых является температура. Настоящая работа посвящена методике оценки термостабильности оптических систем (ОС) беспроводных оптических систем связи, направленной на разработку термостабильных (атермальных) ОС.

### Постановка задачи

Влияние температуры на беспроводные линии связи с точки зрения изменения параметров оптической системы идет по двум направлениям:

- на приёмной стороне смещается фокус принимаемого излучения относительно приемного устройства;
- на передающей стороне изменяется расходимость излучения передатчика из-за смещения точки излучения относительно фокальной плоскости (расстройки ОС).

В связи с тем, что конструкция FSO систем осесимметрична, имеет смысл рассматривать смещения оптических элементов (как и точки фокусировки) только в продольном, параллельном оси диаграммы направленности оптической системы направлении.

Смещение фокальной плоскости ОС относительно приёмника излучения приводит к увеличению размера пятна излучения на приёмнике и может оказывать влияние на запас по усилению, только если размер пятна начинает превышать диаметр активной зоны приемного устройства. Предварительные оценки показали, что апертура приёмника излучения в FSO системах (например, торец многомодового волокна или площадка фотоприемника) значительно больше размера пятна сфокусированного излучения с учетом его возможного увеличения за счёт относительного смещения фокальной плоскости из-за терморасстройки ОС. В связи с этим в данной работе рассматривается только влияние увеличения расходимости излучения.

Увеличение расходимости излучения передатчика приводит к снижению плотности излучения в плоскости приемника и соответственному снижению мощности излучения, поступающего на приемник.

Таким образом, в рамках поставленной задачи необходимо определить изменение расходимости излучения при изменении температуры окружающей среды и, как следствие, влияние последней на запас по усилению атмосферной оптической линии связи.

### Зависимость запаса бюджета линии от расстройки ОС

Запас бюджета в абсолютном выражении определяется отношением принимаемой мощности излучения к чувствительности приемника. В рамках поставленной задачи целесообразно оценивать не абсолютную величину запаса бюджета, а её изменение, вызванное расстройкой ОС за счёт изменения расходимости излучения передатчика. В данном контексте изменение запаса бюджета происходит за счёт изменения плотности мощности излучения на приёмной апертуре  $\Delta B$ . В условиях, когда диаметр пучка излучения на приёмной апертуре больше или равен её диаметру,  $\Delta B$  идентично изменению запаса бюджета. Величина  $\Delta B$  пропорциональна квадрату отношения радиуса пучка после расстройки ОС  $w_2$  к радиусу пучка до расстройки ОС  $w_1$ , и её можно оценить, используя следующее выражение:

$$\Delta B = 20 \cdot \log \left( \frac{w_2}{w_1} \right), \text{ дБ.} \quad (1)$$

Для расчёта радиуса пучка излучения используем приближение гауссовых пучков.

В различных приложениях лазерной оптики при описании пучка излучения используют идеальное приближение, известное как Гауссов пучок [1]. Интенсивность в таком пучке распределена по закону Гаусса.

На рисунке 1 представлен профиль (каустика) сходящегося Гауссовского пучка, выходящего из излучателя TR (например, торца одномодового волокна), проходящего через тонкую линзу (эквивалент объектива АОЛС) и распространяющегося далее в свободном пространстве (справа от линзы) до входной апертуры приемника излучения RCV.

Как видно из рисунка 1, пучок излучения после линзы сходится, имея на расстоянии от линзы  $S_1$  самое узкое сечение (перетяжку) радиусом  $w_{01}$ , и на приёмной апертуре радиус пучка становится равным  $w_1$ .

Радиус перетяжки пучка излучения после линзы определяется выражением:

$$w_{01} = \frac{w_0 F}{\sqrt{(\Delta x)^2 + Z_R^2}}, \quad (2)$$

где  $F$  – фокусное расстояние линзы;  $\Delta x$  – смещение торца излучателя относительно фокуса линзы (расстройка ОС);  $Z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$  – длина Релея;  $\lambda$  – длина волны излучения.

При этом расстояние от линзы до перетяжки пучка излучения за линзой определяется следующим выражением [1]:

$$S_1 = F \left[ 1 + \frac{\frac{F+\Delta x}{F} - 1}{\left(\frac{F+\Delta x}{F} - 1\right)^2 + \left(\frac{Z_R}{F}\right)^2} \right]. \quad (3)$$

Соответственно радиус пучка излучения на расстоянии  $l$  описывается выражением:

$$w_l = w_{01} \sqrt{1 + \left[ \frac{\lambda(l-S_1)}{\pi w_{01}} \right]^2}. \quad (4)$$

Для оценки влияния расстройки ОС на  $\Delta B$  используем следующие параметры:

- длина волны  $\lambda = 1550$  нм;
- радиус перетяжки –  $w_0 = 5$  мкм;
- фокусное расстояние ОС 200 мм.

На рисунке 2 представлены зависимости  $\Delta B(\Delta x)$ , для  $l = 10, 100, 500, 1000$  и  $10000$  м, рассчитанные по формуле (1) с учётом выражений (2), (3) и (4).

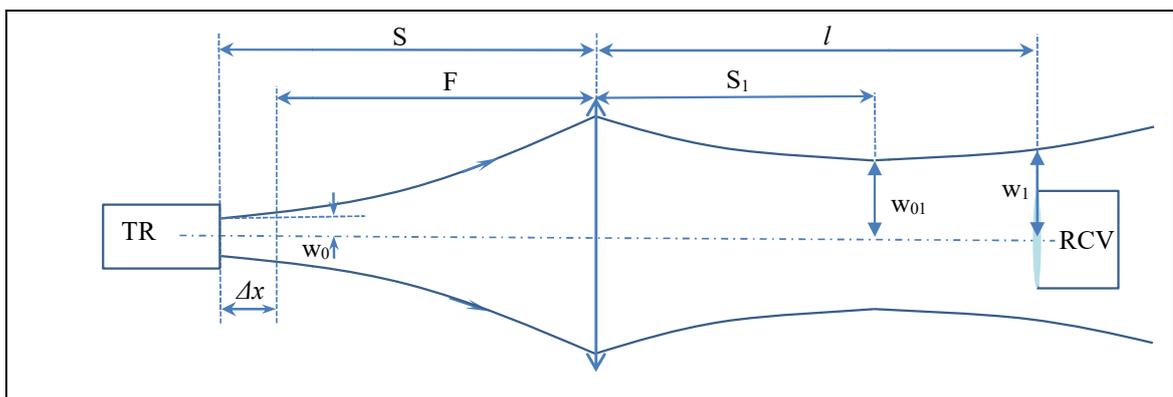


Рис. 1. Профиль Гауссова пучка на пути от передатчика до приёмника АОЛС

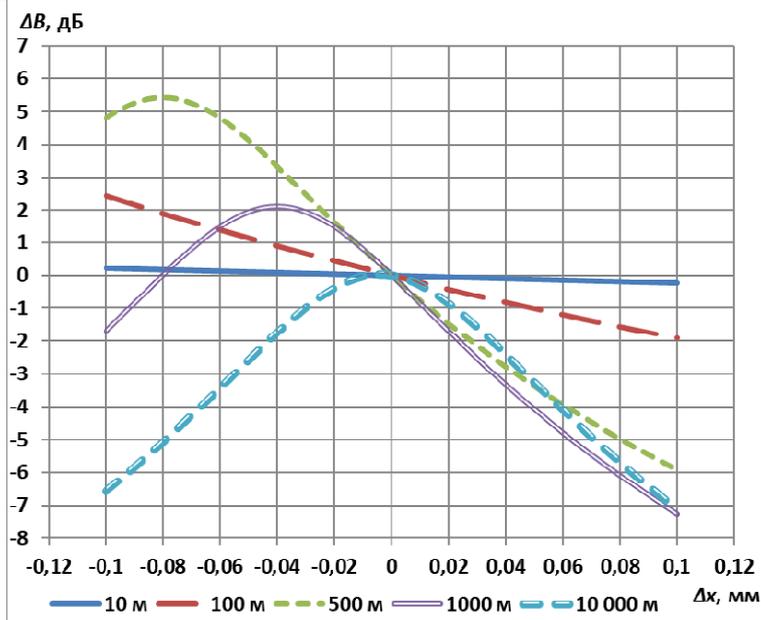


Рис. 2. Зависимость изменения  $\Delta B$  от расстройки ОС для разных расстояний до между терминалами АОЛС

Следует отметить, что, как сказано выше, изменение бюджета совпадает с  $\Delta B$  только на расстояниях, при которых диаметр пучка излучения на входе в приемную апертуру  $w_1$  больше или равен её диаметру. Поэтому при использовании кривых на рис. 2 для оценки запаса бюджета линии следует принимать во внимание соотношение указанных диаметров для выбранного расстояния. Дальнейшие рассуждения будут исходить из того, что  $w_1$  больше диаметра приёмной апертуры.

Из приведённых графиков видно, что при расстоянии 1 км бюджет линии увеличивается на 2 дБ при смещении торца волокна от фокальной плоскости (удалении от линзы) на 40 мкм. Это связано с совмещением положения перетяжки с входной апертурой приемника излучения. Для расстояния 10 км в любом случае диаметр перетяжки больше диаметра входной апертуры приемника, поэтому происходит снижение бюджета линии почти на 7 дБ при расстройке  $\pm 100$  мкм.

При дистанции 500 м изменение бюджета достигает почти 11 дБ. Так, при минусовых значениях расстройки бюджет увеличивается почти на 5 дБ, а при положительных значениях уменьшается на 6 дБ.

Для практики необходимо ввести критерий допустимого снижения бюджета линии за счёт расстройки. Во многом эта величина зависит от общего бюджета линии, для оценки атермальности была введена величина допустимого снижения бюджета линии не более 2 дБ.

### Зависимость расстройки от температуры

При изменении температуры в оптической системе изменяются радиусы кривизны поверхностей, толщина линз и расстояние между ними, а также показатель преломления стекла и окружающей среды. Все это приводит к изменению фокусного расстояния и, что важно, заднего отрезка – расстояния между фокальной плоскостью и ближайшим к ней (последним) оптическим элементом. Любая конструкция оптической системы предполагает некий корпус с закрепленными оптическими элементами и закрепленным на этом корпусе источником излучения. При настройке всего оптического тракта добиваются того, чтобы задний отрезок точно соответствовал расстоянию от источника излучения до последнего оптического элемента.

Изменение заднего отрезка оптической схемы от температуры связано с изменением показателей преломления оптических элементов, изменением их радиусов, а также толщины оптических элементов.

Радиус кривизны поверхности оптических элементов при температуре  $t$  определяется как

$$r_t = r_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t - t_0)),$$

где  $r_{20}$  – радиус кривизны поверхности при  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ .

Показатель преломления стекла при температуре  $t$  определяется как

$$n_t = n_{20} + \beta \cdot (t - t_0),$$

где  $n_{20}$  – показатель преломления при  $20^\circ\text{C}$ ,  $\beta$  – температурный коэффициент показателя преломления,  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения материала.

Показатель преломления стекла N-BK7  $n_{20}$  составляет 1,500652 (на длине волны 1550 нм),  $\alpha = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\beta = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Коэффициент  $\beta$  в свою очередь зависит от температуры и длины волны и определяется соотношением [2]:

$$\beta(\lambda, t) = \frac{n^2(\lambda, t_0) - 1}{2 \cdot n(\lambda, t_0)} \cdot \left( D_0 + 2 \cdot D_1 \cdot \Delta t + 3 \cdot D_2 \Delta t^2 + \frac{E_0 + 2 \cdot E_1 \cdot \Delta t}{\lambda^2 - \lambda_{\text{TK}}^2} \right),$$

где  $n(\lambda, t_0)$  – показатель преломления стекла для заданной длины волны 1550 нм и при температуре  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ , коэффициенты  $D_0, D_1, D_2, E_0, E_1$  представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры стекла N-BK7 Schott [2]

$n(\lambda, T_0)$	1,500625
$D_0$	$1,86 \cdot 10^{-6}$
$D_1$	$1,31 \cdot 10^{-8}$
$D_2$	$1,37 \cdot 10^{-11}$
$E_0$	$4,34 \cdot 10^{-7}$
$E_1$	$6,27 \cdot 10^{-10}$
$\lambda_{TK}, \text{ мкм}$	0,170

На рисунке 3 показана зависимость коэффициента  $\beta$  от температуры для стекла N-BK7. Для реальной практики необходимо ввести критерий допустимого снижения бюджета линии за счет расстройки. Во многом эта величина зависит от общего бюджета линии, для оценки введём величину допустимого снижения бюджета линии не более 2 дБ.

### Конструкция 1 (ОС1)

Рассмотрим оптическую систему 1 одной из моделей серийно выпускаемого FSO оборудования [2]. Крепление оптических элементов на кронштейне с указанием материалов показано на рисунке 4.

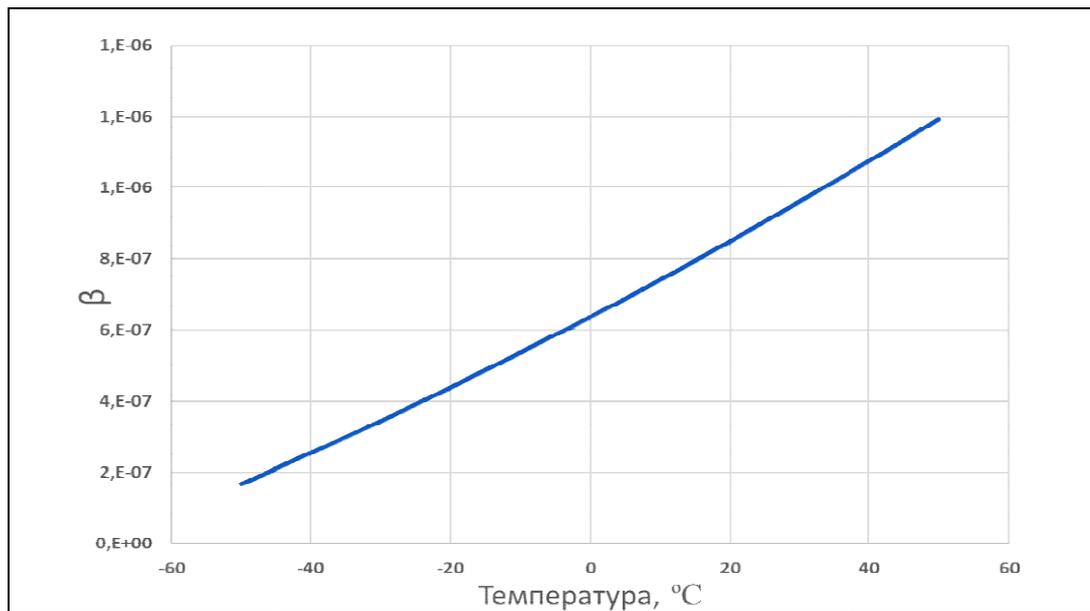
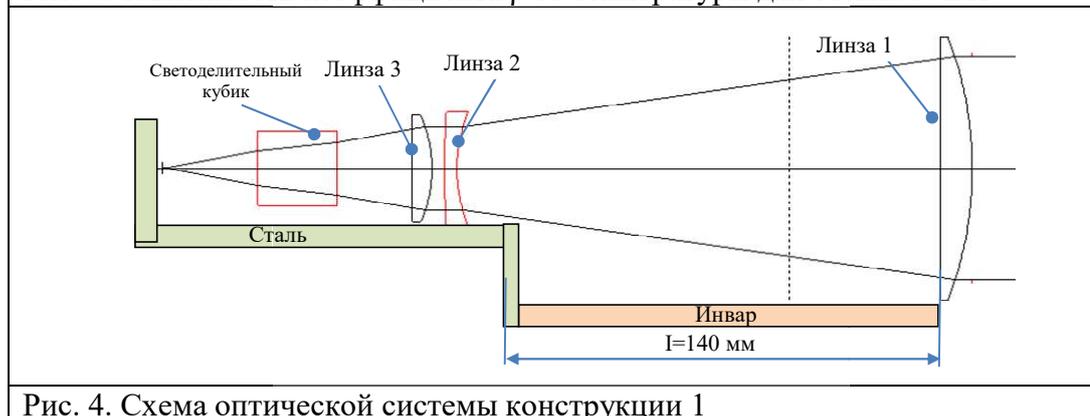
Рис. 3. Зависимость коэффициента  $\beta$  от температуры для стекла N-BK7

Рис. 4. Схема оптической системы конструкции 1

Данная оптическая система состоит из 3-х линз и светоделительного кубика из стекла N-BK7.

Следует отдельно отметить расстояние от светоделительного кубика до источника излучения. Данный размер не зависит от термооптических свойств оптики и определяется только длиной и КТЛР материала крепления источника излучения к оптической системе.

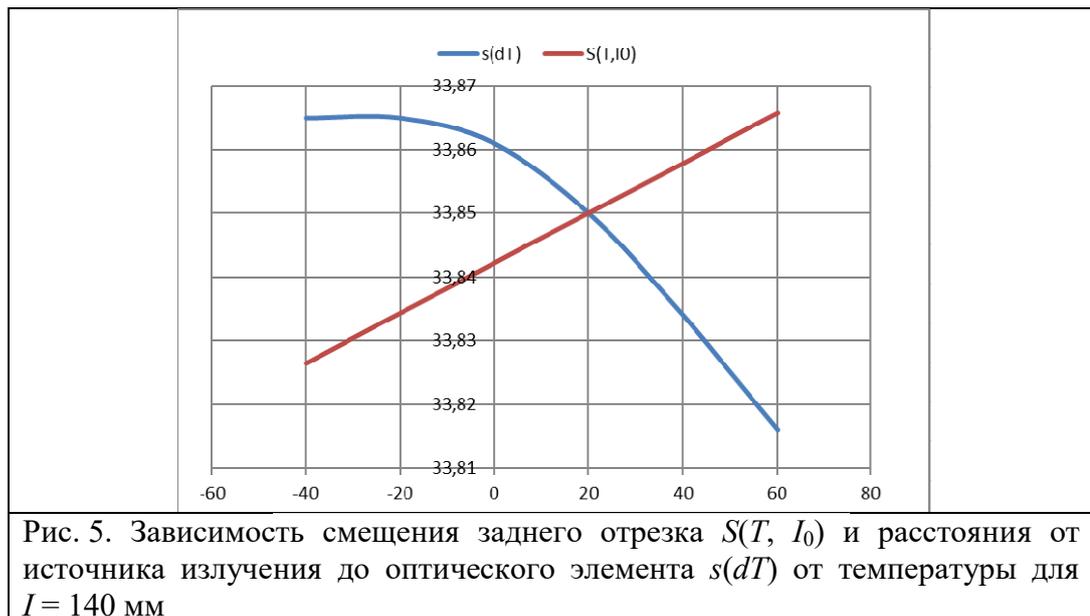
Исходя из приведенного анализа следует, что расстройка источника излучения и фокальной плоскости  $dS(dT, I)$  при изменении длины инварового кронштейна и температуры, будет определяться следующим выражением:

$$dS(dT, I) = S_0(1 + \gamma_s dT) - S(dT, I), \quad (9)$$

где  $S_0$  – величина заднего отрезка при настройке ( $T = 20^\circ\text{C}$ );  $S(T, I)$  – величина заднего отрезка, по разному зависящая температуры для разных  $I$ ,  $dT = (T - 20)$ .

При этом источник излучения геометрически точно совпадает с фокальной плоскостью. Эта величина не зависит от  $I$  для данной оптической системы.

Для расчета  $S(T, I_0)$  была использована программа моделирования оптических систем WinLens3D. Для этого были рассчитаны в диапазоне температур от  $-40^\circ\text{C}$  до  $+60^\circ\text{C}$  все изменяющиеся параметры оптической системы: радиусы линз, толщины оптических элементов, расстояния между ними, показатели преломления стекла и воздуха. Атмосферное давление принималось постоянным (760 мм.рт.ст.). В результате получены зависимости  $S(T, I_0)$  и  $s(dT) = S_0(1 + \gamma_s dT)$ , которые приведены на рисунке 5.



Из графиков на рисунке 5 следует, что в рамках данной конструкции при понижении температуры фокальная плоскость становится ближе к последнему оптическому элементу, чем расстояние до источника излучения. Эта разница достигает 33 мкм при температуре  $-40^\circ\text{C}$ . Это приводит к фокусировке излучения на некотором расстоянии, а затем к увеличению расходимости. При повышении температуры источник излучения становится ближе к оптическому элементу, чем фокальная плоскость. Это приводит к увеличению расходимости. Общая расстройка составляет 90 мкм.

### Конструкция 2 (ОС2)

В качестве второго примера рассмотрим аналогичную оптическую систему 2 (ОС 2) с расстоянием  $I = 186$  мм (рис. 6). Параметры всех оптических элементов остались

прежними. Основное отличие от ОС 1 состоит в изменении расположения двух линз путем удлинения инварового цилиндра и изменения точки крепления его к стальному цилиндру, в котором расположены линзы. Таким образом, линзы располагаются на цилиндрическом (стаканном) компенсаторе.

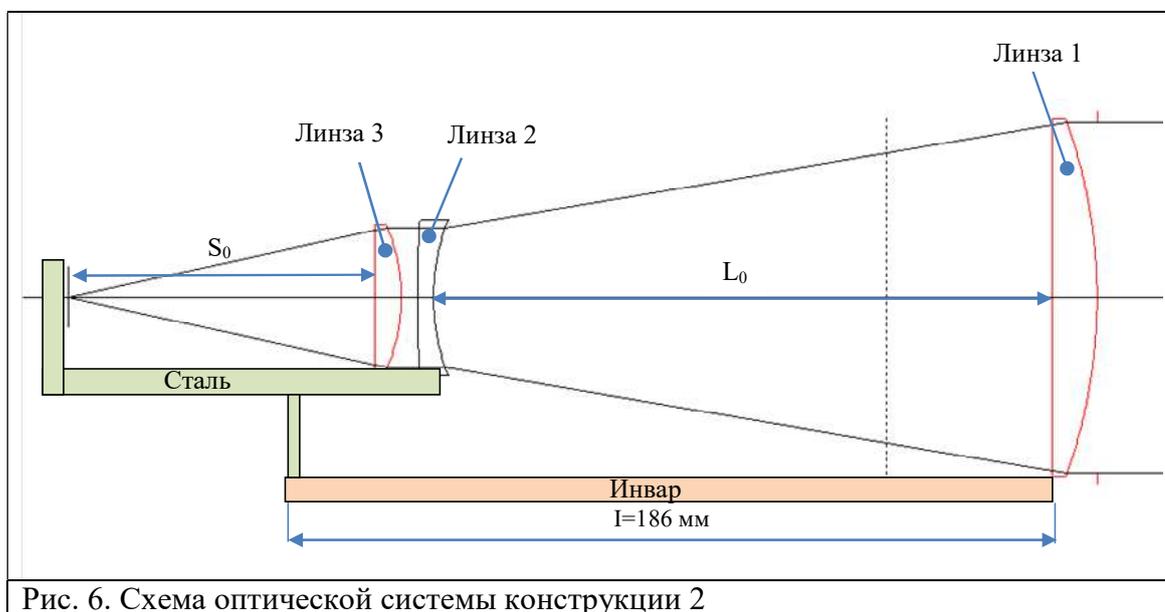


Рис. 6. Схема оптической системы конструкции 2

Приведем параметры оптической системы, показанной на рисунке 6.

Таблица 2

Параметры оптической системы конструкции 2

Обозначение	Материал	R – Радиус, мм	h – Толщина, мм	d – Зазор, мм
Линза 1	N-BK7	133,96		
h1		$\infty$	10,3	
$L_0$	Инвар±сталь			153,66
Линза 2	N-BK7	-53,7		
h2		-328,5	4,0	
d2	сталь			4
Линза 3	N-BK7	46,13		
h3			6,6	
$S_0$	сталь			76,325
$I_0$	Инвар			186

Из рисунка 6 видно, что расстояние между задней поверхностью первой линзы и передней поверхностью второй линзы в зависимости от длины инварового кронштейна  $I$  и температуры можно определить следующим выражением:

$$L(dT, I) = I(1 + \gamma_i dT) - [L_0 - I(1 + \gamma_i dT)](1 + \gamma_s dT),$$

где  $\gamma_i$  – КТЛР инвара,  $\gamma_s$  – КТЛР стали,  $L_0$  – расстояние между задней поверхностью первой линзы и передней поверхностью второй линзы при температуре настройки ( $T_0=20^\circ\text{C}$ ).

КТЛР инвара составляет  $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , КТЛР стали –  $11,6 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Из приведенного соотношения следует, что динамика изменения расстояния между первыми линзами зависит от отношения длины инварового кронштейна  $I$  к расстоянию  $L_0$ .

Если  $I \gg L_0$ , то при нагревании расстояние  $L$  будет уменьшаться, поскольку КТЛР инвара меньше КТЛР стали. При обратном соотношении  $L$  будет увеличиваться. Отметим, что расстояние между второй и третьей линзами полностью определяется термическим расширением стали.

На рисунке 7 приведены расчётные зависимости расстройки фокальной плоскости и источника излучения от температуры для ОС 1 при  $I = 140$  мм и ОС2 при  $I = 186$  мм.

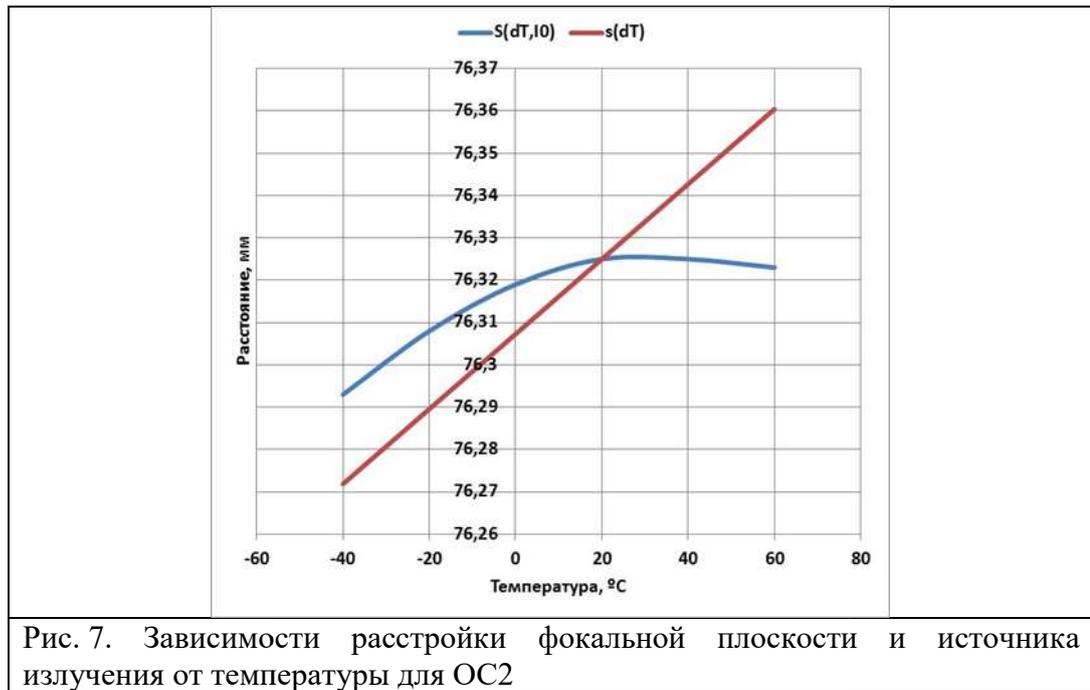
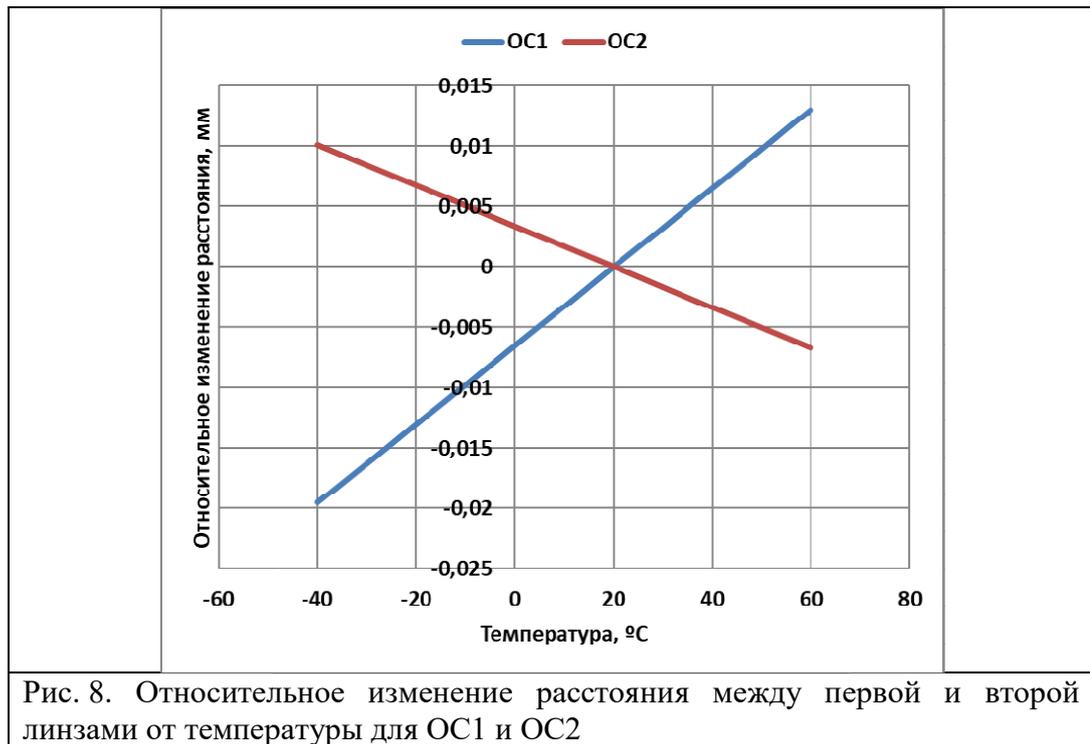


Рис. 7. Зависимости расстройки фокальной плоскости и источника излучения от температуры для ОС2

Как видно из рисунка 7 диапазон расстройки ОС2 составляет около 33 мкм. При этом так же, как и в ранее рассмотренной оптической системе ОС1 отрицательные температуры приводят к фокусировке излучения на некоторой дистанции, а положительные — к увеличению расходимости излучения.

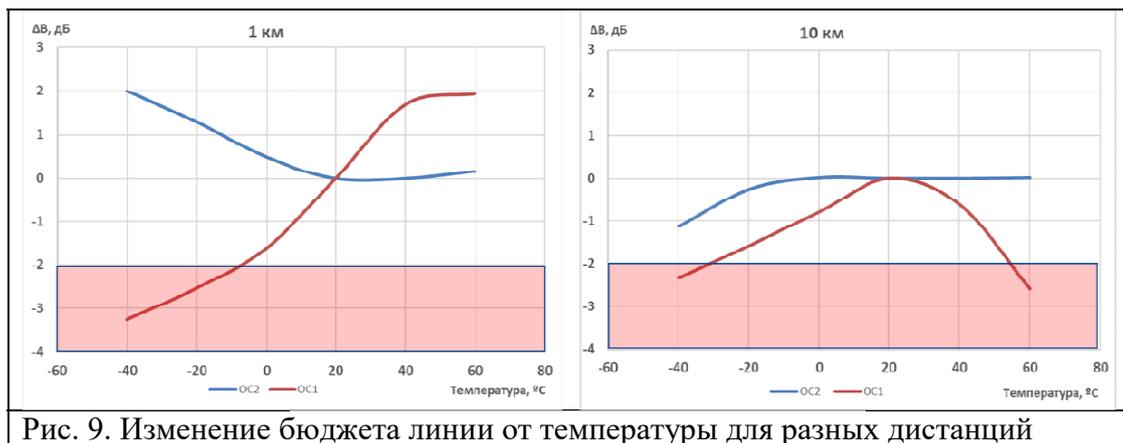
Оценка варианта термокомпенсации конструкции 2 показала, что введение цилиндрического (стаканного) компенсатора позволяет снизить диапазон расстройки [3] с 90 мкм до 33 мкм.

Сразу следует отметить характер изменения расстояния между первой и второй линзами. На рисунке 8 приведены зависимости изменения данного расстояния для длины инварового корпуса 186 мм (ОС2) и 140 мм (ОС1).



Из графиков на рисунке 8 следует, что при использовании кронштейна из инвара длиной 140 мм (ОС1) расстояние между линзами увеличивается с ростом температуры, а для 186 мм (ОС2) — уменьшается. Это приводит к существенному различию динамики изменения заднего отрезка.

На рисунке 9 показано изменение бюджета линии от температуры для дистанций между приборами 1 и 10 км.



Анализ результатов терморасстройки ОС показал, что при отрицательных температурах и дистанции 1 км бюджет линии с ОС2 увеличивается. При отрицательных температурах бюджет линии с ОС2 уменьшается более чем на 3 дБ. При работе на расстоянии 10 км бюджет линии с ОС2 снизится на 3 дБ при как при отрицательных, так и при положительных температурах. Таким образом, расчёты показывают, что введение цилиндрического компенсатора в конструкцию ОС2 делает её полностью атермальной по критерию 2 дБ.

*Лазеры. Измерения. Информация. 2022. Том № 02. № 03 (07)*  
<https://lasers-measurement-information.ru>

Таким образом, методика оценки атермальности ОС, приведённая в данной работе, позволяет оценить влияние температуры на бюджет оптической линии связи. Приведённый способ анализа влияния температуры на параметры элементов оптической системы и её конструкции позволяет как оценить атермальность существующих конструкций систем беспроводной оптической связи, так и даёт возможность обоснованно выбрать механизм компенсации их терморасстройки.

## **Заключение**

Таким образом можно сделать следующие выводы:

1. Предложенная методика оценки атермальности конструкции оптических систем лазерной связи позволяет учесть влияние температуры как на оптические параметры оптических элементов, так и на конструкцию ОС в целом.
2. Рассмотрены две конструкции оптических систем и показано их существенное различие с точки зрения воздействия температуры на запас бюджета лазерной линии связи.
3. Введение цилиндрического компенсатора в оптическую систему 1 позволило добиться её атермальности за счёт уменьшения диапазона расстройки с 90 мкм до 30 мкм, а также снизить диапазон потерь на дистанции 10 км с 2,5 дБ до 1 дБ.
4. Представленную методику можно эффективно применять для анализа влияния температуры на оптические системы.

## **Конфликт интересов**

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

## **Список литературы**

1. Бойко М. В. Гауссовы пучки и лазерные резонаторы // Новосибирск. 2004. 13 с.
2. Мостком. Стационарные терминалы [Электронный ресурс]. – 2022. URL: <http://www.mostkom.ru/ru/%d1%81%d1%82%d0%b0%d1%86%d0%b8%d0%be%d0%bd%d0%b0%d1%80%d0%bd%d1%8b%d0%b5-%d1%82%d0%b5%d1%80%d0%bc%d0%b8%d0%bd%d0%b0%d0%bb%d1%8b/> (Дата обращения 30.06.2022).
3. Гринкевич А. В, Медведев А. В., Князева С. Н. Атермализация объективов прицельно-наблюдательных комплексов как средство обеспечения жизнедеятельности объектов БТВТ / Фотоника №2/56/2016. С. 94–108.

## **Design of athermal optical systems for wireless laser communication**

Baskakova A. V., Kuznetsov S. N., Shirobakin S. E.

*JSC “Mostcom”, Ryazan, Uritskogo, 35*

The capabilities of the free-space optics (FSO) equipment are determined by the quality of the optical system and the stability of its parameters under the influence of external factors, the most

*Лазеры. Измерения. Информация. 2022. Том № 02. № 03 (07)*

<https://lasers-measurement-information.ru>

important of which is temperature. The paper presents a method for assessing the thermal stability of optical systems, which allows to assess the effect of temperature on the optical communication line margin.

*Key words:* free-space optics communication, optical system, athermality, margin.