

СИСТЕМА ЮСТИРОВКИ РАЗРЫВНОГО ОПТИЧЕСКОГО СОЕДИНИТЕЛЯ

© 2012 А.В. Бурдин¹, А.Е. Жуков^{1,2}, Д.В. Кунтушев²

¹ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

² ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Поступила в редакцию 23.03.2012

В работе приведен анализ возможных вариантов организации разрывного оптического соединения (РОС), что позволило отобрать, учитывая особенности эксплуатации инфокоммуникационных сетей ракетно-космической техники, наиболее перспективные, с точки зрения практической реализации, системы юстировок (СЮ): соединение с зазором и линзовое соединение. Разработаны методики расчета параметров оптического соединения, выполненного на базе перечисленных СЮ. Представлены результаты апробации данных методик, на основании которых разработаны практические рекомендации по выбору компонентов СЮ, а также сформулированы требования, предъявляемые к отдельным параметрам центрирующих элементов РОС.

Ключевые слова: *оптический соединитель, система юстировки оптических волокон, распространение оптического излучения*

На сегодняшний день волоконно-оптические технологии находят широкое применение в ракетно-космической технике (РКТ). Одним из ключевых приложений являются инфокоммуникационные сети, обеспечивающие обмен данными между отдельными системами и блоками ракетноносителей (РН), космических аппаратов, а также наземных пультов управления при подготовке и запуске ракет космического назначения. Для подобных сетей возникает задача разработки РОС между отстыковывающимися элементами ракетно-космических комплексов: ступень РН/ступень РН, ступень РН/наземный пульт управления. При этом расстыковка должна управляться удаленно. Авторам неизвестны решения данной задачи. Известны аналоги разрывных соединителей, функционирующих в электрическом интерфейсе [1]. В отличие от последних, одним из основных элементов оптического разрывного соединителя является оптическая СЮ. В этом смысле наиболее известный способ – «соединение с физическим контактом», предполагающий совмещение центров сердцевины оптических волокон (ОВ), вклеенных в феррулы типовых оптических коннекторов, с помощью юстировочных втулок проходных оптических розеток, однако достаточно плотная посадка феррул в центрирующих втулках создает опасность заклинивания соединителя в процессе удаленной расстыковки.

Альтернативным решением для подобных соединителей является использование оптической СЮ, предполагающей наличие воздушного

зазора между торцами ОВ, а также модификацию последнего с установкой оптических линз. Очевидно, что оценка потенциальных возможностей применения указанных СЮ в разрывных оптических соединителях требует проведения соответствующих предварительных теоретических исследований. В данной работе предложены инженерные методики расчета отдельных параметров оптических СЮ ОВ с воздушным зазором и линзовым соединением, приведены результаты их апробации.

Система юстировки с воздушным зазором между торцами ОВ. Применение подобной СЮ в разрывном оптическом соединителе дает возможность увеличения зазора между феррулом коннекторов и центрирующим элементом, что позволяет исключить заклинивание разъемов при расстыковке соединителя. Для описания распространения светового пучка с выхода торца ОВ в пределах воздушного зазора предлагается использовать следующее известное соотношение [2]:

$$\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = 1 + \left(\frac{z}{z_d}\right)^2, \quad (1)$$

где ω_0 – диаметр пятна моды на выходе ОВ, ω – диаметр пятна моды после прохождения зазора z , z – зазор между торцами ОВ, z_d – дифракционная длина гауссова пучка, рассчитываемая по формуле [2]:

$$z_d = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda},$$

где λ – длина волны излучения.

Бурдин Антон Владимирович, кандидат технических наук. E-mail: bourdine@yandex.ru

Жуков Александр Евгеньевич, аспирант. E-mail: aadron@bk.ru

Кунтушев Данила Валентинович, начальник отдела

С точки зрения бортовых систем и, в частности, систем РКТ, одним из основных требований, предъявляемых к линиям передачи сети, является повышенная устойчивость к вибрациям. Этому критерию, в отличие от одномодовых, полностью отвечают многомодовые ОВ. В то же время современное оборудование оптических мультитерабитных систем передачи в качестве источников использует исключительно лазеры, т.к. многомодовые светодиоды не поддерживают требуемую частоту модуляции [3]. Согласно теории связи мод [4] при вводе основной моды LP_{01} с выхода одномодового лазерного диода в многомодовое ОВ подавляющая часть мощности будет перераспределяться между модами этого же азимутального порядка LP_{0m} , при этом формируется так называемый маломодовый режим передачи сигнала [5]. Исходя из малой протяженности зазора, не превышающей 2 мм, при расчете динамики маломодового сигнала, который представляет собой суперпозицию полей модовых компонентов, возбуждаемых одномодовым лазером (рабочая длина волны $\lambda=1310$ нм), в многомодовом ОВ рассматривается упрощенный подход, пренебрегающий такими факторами искажения, как дифференциальная модовая задержка, хроматическая дисперсия, поляризационная модовая дисперсия. Основное внимание уделяется анализу изменения структуры поля модовых компонентов сигнала. Для этой цели предлагается воспользоваться приближением Гаусса [4]. Последнее базируется на аппроксимации поля моды волоконного световода с произвольным профилем показателем преломления полем моды волоконного световода с некоторым параболическим показателем преломления. Указанная аппроксимация сводится к определению эквивалентного радиуса пятна моды R_0 для заданных параметров ОВ. Найденный параметр R_0 является для данного приближения базовым и полностью определяет искомые характеристики моды. В соответствии с данным методом, радиальную зависимость поля моды $F_m^l(r)$ световода с произвольным профилем показателя преломления аппроксимируется следующим известным выражением [4]:

$$F_m^l(r) = \left(\frac{r}{\rho_0}\right)^l L_{m-1}^{(l)}\left(\frac{r^2}{\rho_0^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{\rho_0^2}\right), \quad (2)$$

где r – радиальная координата, ρ_0 – радиус пятна моды, l и m – азимутальный и радиальный порядок моды LP_{lm} , соответственно, $L_{m-1}^{(l)}$ – полином Лагерра.

В качестве исходных данных к расчету предлагается использовать градиентный показатель преломления многомодового ОВ 50/125, воспроизведенный на основе данных протокола измерения образца реального волокна производства компании Corning® категории OM2+ [6], представляющий собой практически идеальный

градиент со слабо выраженными локальными флуктуациями показателя преломления. В свою очередь, для расчета исходных диаметров пятна ω_0 модовых компонентов LP_{0m} предлагается воспользоваться модификацией приближения Гаусса, обобщенной на случай анализа слабонаправляющих градиентных многомодовых ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления [7]. Последующая подстановка полученных исходных значений ω_0 в (1) с учетом (2) позволит построить диаграмму и контур динамики светового пучка, при прохождении воздушного зазора с выхода торца многомодового ОВ, возбуждаемого одномодовым когерентным источником оптического излучения, которые представлены на рис. 1 и 2.

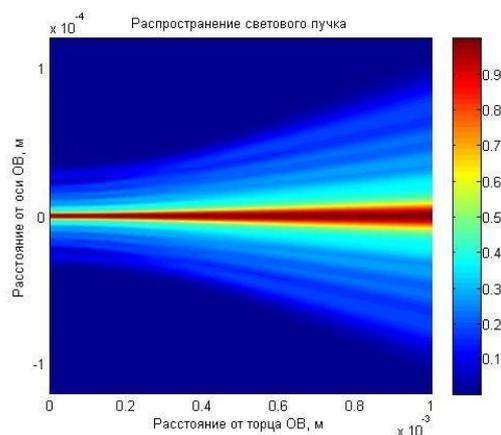


Рис. 1. Диаграмма динамики светового пучка при прохождении воздушного зазора с выхода торца многомодового ОВ, возбуждаемого одномодовым когерентным источником оптического излучения

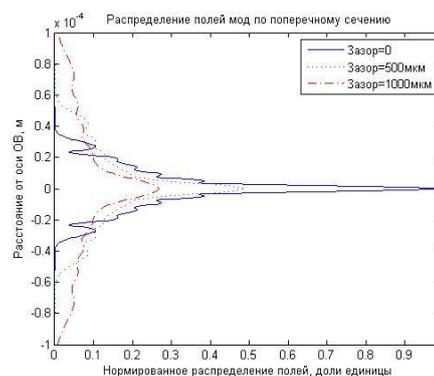


Рис. 2. Контур динамики светового пучка при прохождении воздушного зазора с выхода торца многомодового ОВ, возбуждаемого одномодовым когерентным источником оптического излучения

Анализ полученных результатов показывает, что при малом зазоре (до 200 мкм) световой пучок расширяется незначительно по сравнению с распределением на выходе из ОВ. Расхождение диаметра суперпозиции полей, взятого по уровню E_{\max}/\exp , где E_{\max} – максимальное значение распределения суперпозиции мод, составляет не

более 24%. При этом максимальное значение суперпозиции мод снижается на 18%. Для зазора 500 мкм расхождение диаметра и снижение максимального значения составят 102% и 51% соответственно, для зазора 1 мм – 365% и 74 %. Значение зазора между феррулом и центрирующей втулкой, при котором исключается заклинивание, зависит от многих факторов: количества контактов в соединителе, усилия, прикладываемого для расстыковки, отклонения направления усилия от оси центрирующих втулок, условий внешней среды и в общем случае может определяться только империческим путем, поэтому расчеты проводились с учетом различных значений рассогласований. Результаты расчетов вносимых потерь приведены на рис. 3.

Исходя из значений параметров компонентов оптической системы передачи, приведенных в [11], вносимые потери в оптическом соединении до 5 дБ является приемлемым, поэтому допустимым является осевое рассогласование торцов ОВ порядка 30 мкм при зазоре порядка 1200 мкм. Фиксацию размера зазора можно обеспечить вставкой диска с отверстием между торцами керамических феррулов по аналогии с [10]. Данные результаты являются предварительными; в целом нужно усложнить модель и, в первую очередь, учесть индивидуальные затухания модовых компонентов при распространении в воздухе.

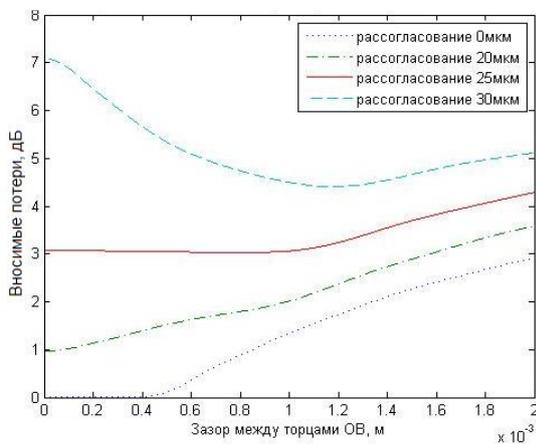


Рис. 3. Вносимые потери соединения с зазором между торцами ОВ при осевом рассогласовании

Линзовая система юстировки. Основным преимуществом оптического соединения с применением линз является гарантированное исключение заклинивания и минимальное влияние внешних факторов на параметры соединения. Однако линзовое соединение характеризуется большим затуханием по сравнению с соединением с зазором. В идеальной оптической системе лучи света после прохождения второй линзы собираются в одной точке – фокусе. В реальности присутствуют сферические aberrации – отклонения световых лучей от идеальной траектории распространения. Учитывая особенности конструкции рассматриваемой линзовой СЮ и, в

частности, достаточно большое (несколько мм) расстояние между линзами зазора, в данном случае для расчета соединителя удобно воспользоваться лучевым анализом [4].

В соответствии с законами геометрической оптики было проведено моделирование прохождения света через линзовую оптическую систему. Точечный излучатель располагался в фокусе первой линзы. В силу малого расстояния между линзами угловыми и осевыми рассогласованиями можно пренебречь. В качестве модели линзы принималась модель толстой линзы (преломление света рассчитывалось для обеих поверхностей линзы) с применением закона Снелла. Для расчетов принималась плоско-выпуклая линза LA1116 - N-BK7 с диаметром 6мм и фокусным расстоянием 10 мм [8]. Результаты расчета прохождения лучей через область, близкую к фокусу второй линзы, при расстоянии между линзами 6 мм приведены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что aberrации оптической системы невелики, особенно для области светового пучка с малыми α , в которой сосредоточена основная часть световой энергии. Таким образом, линзовую оптическую систему для оптических контактов разрывного соединителя можно считать идеальной, а значит рассматривать сечение светового пучка фокальной плоскостью второй линзы как точку.

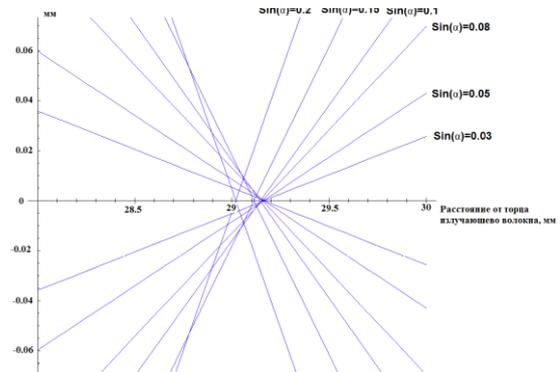


Рис. 4. Прохождение лучей через область близкую к фокусу второй линзы: α – угол вышедшего из передающего ОВ светового луча к оси ОВ

Потери оптического сигнала будут складываться из потерь на отражение от торцов ОВ, потерь в линзах и потерь за счет рассогласования светового пучка, прошедшего через оптическую систему линз, и ОВ. Между торцом ОВ и линзой имеется воздушный промежуток, поэтому коэффициент прохождения света на разделе сердцевина ОВ/воздух вычисляется по формуле:

$$K = 1 - \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2}; \tag{3}$$

где – n_1, n_2 – показатели преломления первой и второй сред.

Для случая воздуха ($n=1$) и материала сердцевинного волокна ($n \approx 1,5$) коэффициент прохождения границы сердцевина ОВ/воздух (воздух/серцевина ОВ) составляет порядка 96% или 0,12 дБм. Таких границ две, поэтому затухание отражения на торцах волокон составит 0,24 дБм. Потери в линзах регламентируются производителем. Например, для линзы LA1116 - N-BK7 [8] потери на длине волны 1300 нм составляют порядка 93% или 0,315 дБм. Количество линз – 2 штуки, поэтому потери в линзах составят около 0,63 дБм.

Для расчета потерь за счет рассогласования светового пучка и торца принимающего ОВ будем интегрировать интенсивность светового пучка по площади сердцевинного ОВ с учетом радиального и осевого рассогласования. Потери за счет рассогласования светового пучка и сердцевинного оптического волокна будут зависеть от отношения их диаметров и отклонения осей светового пучка и сердцевинного оптического волокна. В приведенной ниже методике предполагается, что в многомодовое ОВ вводят только основную моду, то есть основная часть мощности будет передаваться именно на ней, поэтому с точностью, пригодной для расчетов, в качестве закона распределения интенсивности света в поперечном сечении волокна принимаем Гауссов закон распределения. Прохождение света через линзу не влияет на закон распределения света в поперечном сечении светового пучка [9], поэтому закон распределения света в световом пучке принимаем также Гауссовым. За начало координат возьмем центр светового пучка. За ось абсцисс возьмем прямую, проходящую через центры светового пучка и сердцевинного оптического волокна. Световой поток через поперечное сечение светового пучка находим интегрированием интенсивности по области светового пучка:

$$\Phi_{\text{пучка}} = \int_{-a_0}^{a_0} \int_{-a_0}^{a_0} I_0 \cdot \left(e^{-\frac{2(x^2+y^2)}{a_0^2}} \right) \cdot dx \cdot dy; \quad (4)$$

где I_0 – интенсивность на оси волокна, a_0 – радиус поля моды.

Световой поток, захватываемый сердцевинной ОВ, находим интегрированием той же интенсивности, что и в (4), но по области сечения сердцевинного ОВ с учетом смещения.

$$\Phi_{\text{пятна_моды}}(S) = \int_{-\frac{d}{2}+S}^{\frac{d}{2}+S} \int_{-\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2-(x-S)^2}}^{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2-(x-S)^2}} I_0 \cdot \left(e^{-\frac{2(x^2+y^2)}{a_0^2}} \right) \cdot dy \cdot dx; \quad (5)$$

где d – диаметр сердцевинного волокна, S – смещение осей светового пучка и сердцевинного оптического волокна. Отношение

$$10 \lg \left(\frac{\Phi_{\text{пучка}}}{\Phi_{\text{пятна_моды}}} \right); \quad (6)$$

и будет искомым затуханием в дБм.

В случае, когда световой пучок будет полностью содержаться в поперечном сечении сердцевинного волокна (поле моды), весь световой поток пойдет в волокно, и затухания за счет рассогласования светового пучка и сердцевинного ОВ не будет, потери составят 0,87 дБ. При подстановке конкретных значений параметров оптических волокон и собирающих линз были получены следующие результаты потерь за счет рассогласования светового пучка и сердцевинного ОВ, представленные на рис. 5. Из рис. 5 видно, что при затухании оптического соединения, например, в 5 дБ допустимым является радиальное рассогласование в 150 мкм и осевое рассогласование порядка 40 мкм.

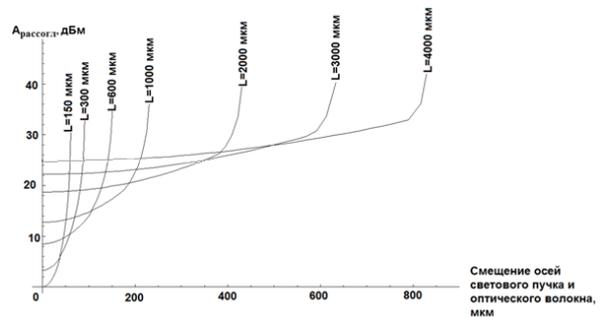


Рис. 5. Результаты расчетов допусков на рассогласование светового пучка и сердцевинного многомодового ОВ: L – расстояние от фокальной плоскости второй линзы до параллельной плоскости, содержащей торец приемного ОВ

Анализ полученных результатов показывает высокую чувствительность затухания линзового оптического соединения к осевому рассогласованию второй линзы и приемного волокна и при этом относительно небольшую чувствительность к продольному рассогласованию. Таким образом, при изготовлении коллиматоров прежде всего необходимо контролировать осевые рассогласования линз и ОВ. Надо отметить, что осевые рассогласования двух линз практически не влияют на смещение светового пучка в области фокуса второй линзы, что является несомненным преимуществом линзового соединения. Предложенная выше методика дает предварительные результаты. Для более точного расчета параметров соединения нужна более строгая модель, учитывающая волновые эффекты светового пучка.

Выводы: в работе предложены и обоснованы варианты систем юстировки ОВ в элеткро-разрывных оптических соединителях ступень РН/ступень РН, ступень РН/наземный пульт управления. Предложены инженерные методики расчета отдельных параметров оптических систем юстировки ОВ с воздушным зазором и линзовым соединением, приведены результаты их апробации. Анализ полученных результатов показал возможность применения как линзовых систем юстировки, так и систем юстировки с воздушным зазором. Расчитаны допуски на осевые рассогласования торцов приемных волокон

относительно падающего светового пучка для допустимого значения затухания в 5 дБ: для соединения с зазором допуск составил порядка 30 мкм (при зазоре в 1200 мкм), для линзового соединения – порядка 40 мкм. Оптические соединения для разрывного оптического соединителя являются предпочтительными за счет простоты конструкции, отсутствия дополнительных оптических элементов и большей изолированности от внешней среды, что в свою очередь приведет к уменьшению массо-габаритных показателей и повышению надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Каталог продукции ОАО «Лтава»: http://www.ltava.com.ua/download.php?file=pdf_docs/Catalogue.
2. Козанне, А. Оптика и связь: Оптическая передача и обработка информации: пер. с фр./ А. Козанне, Ж. Флере, Г. Мэтр, М. Руссо – М.: Мир, 1984. 504 с.
3. Bottacchini, S. Multi-gigabit transmission over-multimode optical fiber. Theory and design methods for 10 GbE systems. – West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2006. 654 p.
4. Снайдер, А. Теория оптических волноводов: пер. с англ. / А. Снайдер, Дж. Лав. – М.: Радио и связь, 1987. 656 с.
5. Бурдин, А.В. Маломодовый режим передачи оптических сигналов по многомодовым волокнам: приложения в современных инфокоммуникациях. – Самара: ПГУТИ, 2011. 274 с.
6. Бурдин, А.В. Исследование дефектов профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон кабелей связи / А.В. Бурдин, К.А. Яблочкин // Инфокоммуникационные технологии. 2010. №2. С. 22-27.
7. Bourdine, A.V. Method for chromatic dispersion estimation of high-order guided modes in graded index single-cladding fibers // Proceedings of SPIE. 2006. Vol. 6605. P. 660509-1 – 660509-13.
8. Каталог продукции фирмы «Thorlabs»: http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=112
9. Короленко, П.В. Оптика когерентного излучения. Учебное пособие. – М., 1997. 222 с.
10. Aronson, L. Fieldworthy ROFL/OFL multimod fiber differential mode delay measurement system / L. Aronson, L. Buckman // IEEE 802.3z Task Force. Presentation materials, February 1998 meeting. 1998. p. 39.
11. МОП 44 001.19-2010. Перечень электрорадиоизделий, разрешенных к применению при разработке (модернизации), производстве и эксплуатации аппаратуры, приборов, устройств и оборудования военного назначения. 37 с.

ADJUSTMENT SYSTEM OF THE BREAK-UP OPTICAL CONNECTOR

© 2012 A.V. Burdin¹, A.E. Zhukov^{1,2}, D.V. Kuntushev²¹ Volga Region State University of Telecommunications and Computer Science² Federal State Unitary Enterprise State Scientific Production Rocket Space Center “TsSKB-Progress”, Samara

In work the analysis of possible variants of organization the break-up optical connection (BOC), that allowed to select, considering features of exploitation the infocommunication networks of space-rocket techniques, the most perspective from the point of view of practical realization, adjustment system (AS): connection with a gap and lens connection is resulted. The methods of calculation the parameters of optical connection made on the basis of listed AS are developed. Results of approbation of the given methods on which basis practical recommendations for choice the components of AS are developed, and also the requirements are presented to separate parameters of centering elements of BOC are formulated.

Key words: *optical connector, adjustment system of optical fibers, distribution of optical radiation*

Anton Burdin, Candidate of Technical Sciences. E-mail:

bourdine@yandex.ru

Alexander Zhukov, Post-graduate Student. E-mail:

aadron@bk.ru

Danila Kuntushev, Chief of the Department