

Разработка автоматической системы подстройки положения оси лазерного излучения для воздушного канала связи

К.С. Назарова,* В.В. Давыдов

*Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
институт электроники и телекоммуникаций, инфокоммуникационные технологии и системы связи. Россия,
194064, Санкт-Петербург, Политехническая улица, д. 29.*

(Поступила в редакцию 25.05.2023; подписана в печать 22.09.2023)

Обоснована необходимость разработки оптических систем подстройки положения оси лазерного излучения на фотоприемном модуле для воздушной волоконно-оптической линии связи. Разработана конструкция оптической системы для подстройки оси лазерного излучения на фотоприемном модуле в плоскости, перпендикулярной оси лазерного излучения. Проведено моделирование работы оптической системы по управлению положением оси лазерного излучения на фоточувствительном слое фотоприемника. Определены оптимальные параметры компонентов системы и предложены методы управления, которые позволяют достичь необходимой точности и стабильности направления излучения. Представлены экспериментальные исследования, направленные на корректировку положения пластин относительно направления оси лазерного излучения и изменение их показателя преломления путем изменения напряжения. Подтверждена эффективность разработанной оптической системы и определены оптимальные параметры её оптических элементов.

PACS: 42.79.Sz

УДК: 535.015

Ключевые слова: оптическая система, полупроводниковый лазер, ось лазерного излучения, кварцевые пластины, показатель преломления, линейная и квадратичная аппроксимации.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения различных задач по передаче информации в мире используются различные системы связи [1, 2]. Среди них наибольший объем в передаче информации приходится на волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) различных моделей [3, 4]. Особенно много моделей цифровых ВОЛС в городской среде, которая перегружена различными системами связи и телекоммуникаций [4, 5]. Это приводит к большим проблемам в отличие от аналоговых ВОЛС [6] при их эксплуатации. Оптическая сеть в крупных городах работает с высокой перегрузкой. Традиционные способы модернизации оптической сети в условиях высокой плотности коммуникаций создают много проблем [7–10]. В плотной городской среде, особенно с высотными зданиями, в которых находится большое количество пользователей, одним из решений этой задачи является применение воздушного оптического канала связи (ВОКС).

Одной из основных проблем в работе ВОКС является смещение по различным причинам оси лазерного излучения, в котором заложена информация, относительно плоскости фотоприемника. Смещение оси лазерного излучения от центра фоточувствительного слоя фотоприемного модуля приводит к уменьшению амплитуды регистрируемого сигнала. Отношения сигнал/шум (S/N) уменьшается, количество битовых ошибок (BER) увеличивается.

В современном мире разработано большое число различных способов и методик для решения этой пробле-

мы [7–12]. Эти решения в основном реализованы под конкретную задачу передачи информации и эксплуатацию ВОКС в определенных условиях. Универсальных решений (применимы для различных конструкций ВОКС) с использованием оптических элементов крайне мало. Поэтому разработки новых универсальных автоматических систем для управления положением оси лазерного излучения крайне актуальны.

1. КОНСТРУКЦИЯ ВОЗДУШНОГО ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДСТРОЙКИ ОСИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Анализ методов, используемых для постройки положения оси лазерного излучения и фотоприемного модуля в ВОКС с использованием перемещения лазера или фотоприемника, или зеркал, или линзы позволил предложить нам новую оптическую систему автоматической подстройки в ВОКС. На рис 1 представлена разработанная нами конструкция воздушного оптического канала связи с новым модулем автоподстройки.

Подстройка положения оси лазерного излучения осуществляется по максимуму амплитуды тока регистрируемого оптического сигнала на фотоприемном модуле 6. В случае смещения оси лазерного излучения от центра фотоприемного модуля 6 в устройстве 13 формируется сигнал ошибки, который передается с использованием радиоканала в здание, где расположен передающий лазерный модуль 2. Принципиально новым элементом в данной конструкции является разработанная нами автоматическая оптическая система для подстройки положения оси лазерного луча. На рис 2 представлена разработанная нами конструкция одна из двух частей автоматической системы подстройки поло-

* knazarova0@ya.ru

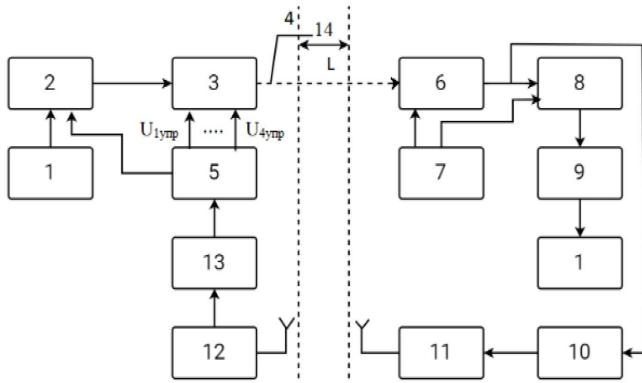


Рис. 1. Структурная схема воздушного оптического канала связи: 1 – сервер, 2 – лазерный передающий модуль с электрооптическим модулятором, 3 – автоматическая система подстройки положения оси лазерного излучения, 4 – лазерное излучение, 5 – многофункциональный блок питания, 6 – фотоприемный модуль, 7 – блок питания фотоприемника, 8 – АЦП, 9 – устройство обработки информации, 10 – измеритель тока, 11 – устройство обработки и передачи данных, 12 – радиоприемное устройство, 13 – устройство обработки информации и управления, 14 – воздушное пространство

жения оси лазерного излучения 3 для ВОКС (рис 1).

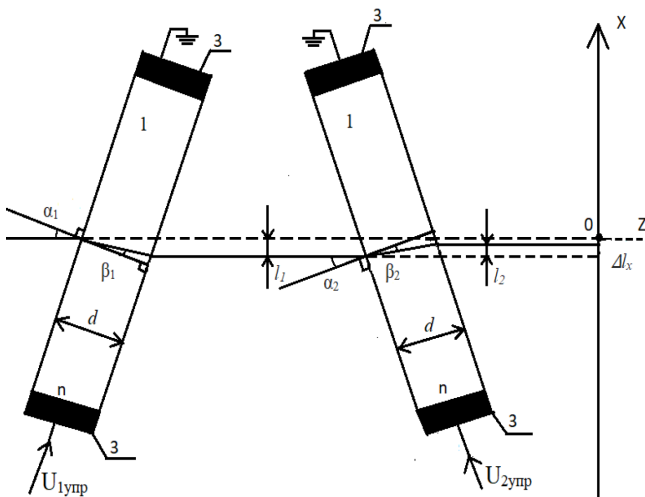


Рис. 2. Структурная схема части автоматической системы подстройки положения оси лазерного излучения по координате X в плоскости перпендикулярной oZ: 1 – кварцевая пластина, 2 – лазерное излучение, 3 – медная пластина

На рис 2 представлено изменение положения оси лазерного излучения в плоскости oX . Для изменения положения оси лазерного излучения в плоскости oY используется такая же часть разработанной нами конструкции оптической системы (рис 2). Только в этом случае пластины 2 (рис 2) будут ориентированы к плоскости падения лазерного излучения по оси oZ под другим углом. Для реализации процесса управления положением оси лазерного излучения

с использованием разработанной нами оптической конструкции 3 (рис 1) необходимо, чтобы на торец пластин поступало излучение с плоскопараллельным фронтом. Для этого в лазерном передающем модуле 2 используется встроенная оптика (макролинза с коротким фокусным расстоянием). Макролинза размещается на торце лазерного резонатора, так чтобы перетяжка лазерного пучка размещалась в её фокусе.

Управление положением оси лазерного пучка осуществляется приложением напряжения к торцам пластин 1. Под действием напряжения изменяется показатель преломления n кварца или другого материала, из которого изготовлена пластина. Положение оси лазерного излучения смещается на расстояние Δl_x and Δl_y в заданной плоскости. Для определения значений Δl_x и Δl_y необходимо от изменения n вывести математические соотношения. С учетом симметричности расположения пластин относительно друг друга формула для вычисления Δl_x или Δl_y будет одинакова (различие будет только в углах наклона пластин α).

2. РАСЧЕТ СМЕЩЕНИЯ ОСИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДСТРОЙКИ

Для разработанной конструкции оптической системы (рис 2) были выполнены формулы для определения смещения оси лазерного излучения Δl_x в плоскости oX от изменения различных параметров.

$$\Delta l_x = l_1 - l_2, \quad (1)$$

$$l_1 = d \left(\sin(\alpha_1) - \frac{\frac{\sin(\alpha_1) * n}{n_0} \times \cos(\alpha_1)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin(\alpha_1) * n}{n_0}\right)^2}} \right), \quad (2)$$

$$l_2 = d \left(\sin(\alpha_2) - \frac{\frac{\sin(\alpha_2) * n}{n_0} \times \cos(\alpha_2)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin(\alpha_2) * n}{n_0}\right)^2}} \right). \quad (3)$$

При исследованиях изменения Δl_y использовали формулы (2) и (3) с углами α_3 и α_4 . Основным параметром, который используется для управления значением Δl_x является показатель преломления n . Для различных материалов, которые будут использоваться в оптической системе 3 были проведены исследования изменения n от длины волны λ . Для исследований использовался многоволновый рефрактометр Аббе (диапазон изменения длинны волны от 450 до 1860 нм). Рабочий диапазон температур с использованием циркулярной бани составлял от 5 до 50°C. На рис 3 для примера представлены результаты этих исследований с акцентом на значение $\lambda = 1550$ нм при температуре $T \approx 294$ К (это оранжевая точка на графиках). Это необходимо делать, так как сейчас выпускаются

различные типы кварцевых образцов (куб, параллелепипед и прочие), у которых показатель преломления отличается от чистого кварца, используемого в оптических волокнах, на длинах волн в диапазонах от 1310 до 1650 нм. Проведенные нами исследования все это подтвердили. Данное несоответствие приводит при расчете конструкции оптической системы к дополнительной ошибке от 0.5 до 1.0 мм при определении положения оси лазерного излучения на поверхности фотоприемника.

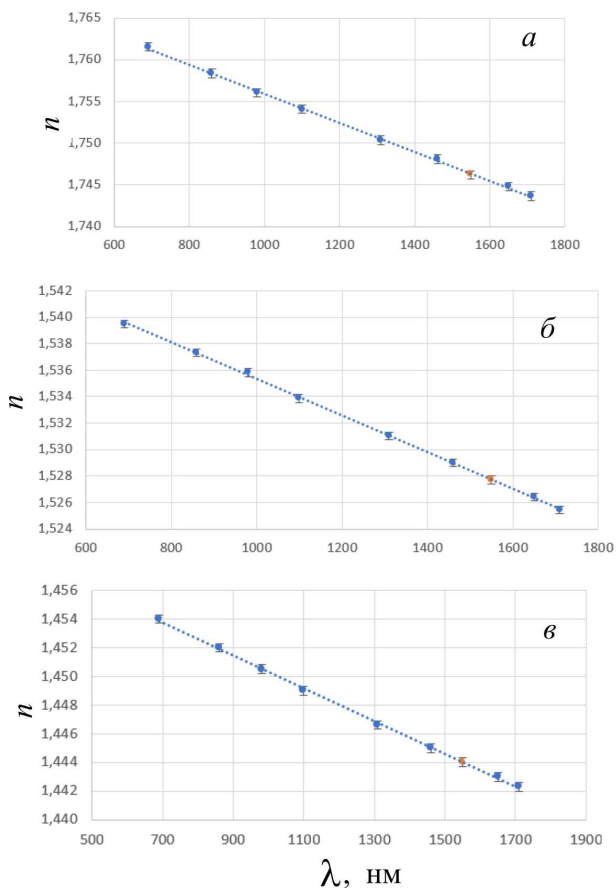


Рис. 3. Экспериментальная зависимость изменения показателя преломления n от λ . Графикам *а*, *б* и *в* соответствуют следующие материалы: сапфир, кварц, стекло КУ-1

Для определения наилучшего положения пластинок к оптической оси лазерного передающего модуля было выбрано оптимальное значение угла α для трех материалов, которые предполагается использовать для изготовления пластинок (кварц, стекло КУ-1 и сапфир). Для этого было выполнено дифференцирование зависимостей (2) и (3) по углам α_1 и α_2 . Полученные производные были приравнены к нулю и определены значения α_1 и α_2 . Для всех трех материалов (показатель преломления использовался для $\lambda = 1550$ нм при температуре $T \approx 294$ К) было установлено, что значение оптимальных углов составило около 52° (критическая рабочая точка, в которой при наименьшем изменении показателя оптического материала происхо-

дит наибольшее изменение значений Δl_x и Δl_y). Это необходимо для обеспечения высокой чувствительности системы подстройки оси лазерного излучения относительно центра фоточувствительного слоя приемного модуля 6 (рис. 1). На рис. 4 в качестве примера представлены результаты исследования влияния изменения угла наклона α на смещение Δl_x и выполнена аппроксимация.

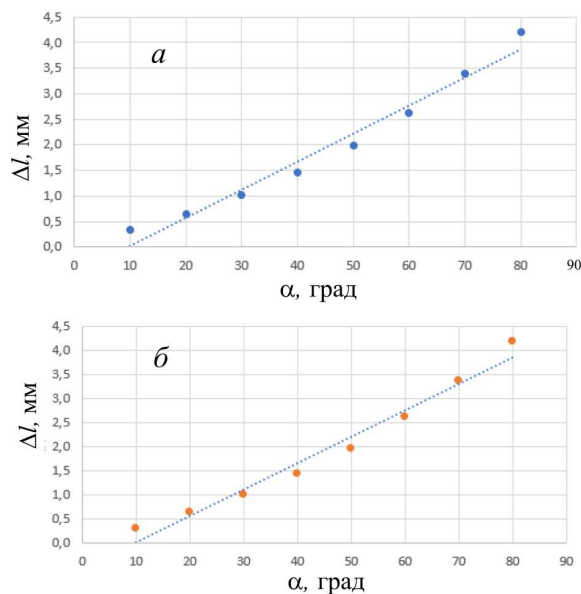


Рис. 4. Расчет изменения смещения оси лазерного излучения от угла наклона пластинок для показателей преломления кварца (*а* — измеренный с использованием рефрактометра, *б* — линейная аппроксимация из табличных значений при определении n для $\lambda = 1550$ нм)

Анализ полученных результатов показал, что наиболее удачным является размещение отклоняющих пластинок 1 (рис. 2) под углом $\alpha \approx 52^\circ$. Это оптимальное значение угла α в пределах ± 30 мин соответствует всем трем материалам (кварц, стекло КУ-1 и сапфир). В этих исследованиях использовалось $d = 8$ мм.

Для определения возможности подстройки положения оси лазерного излучения было исследовано изменение Δl_x от изменения значения показателей преломления n для трех материалов. На рис. 5 представлены результаты исследований для случая $\alpha = 52^\circ$, $d = 4$ см. Оранжевая точка на графиках соответствует значению показателя преломления, полученному ранее (рис. 3) для $\lambda = 1550$ нм при температуре $T \approx 294$ К.

Определено положение максимальной крутизны зависимости $\Delta l(\alpha)$ по углу наклона пластинок для обеспечения максимальной чувствительности системы автоматической подстройки положения оси лазерного излучения на фотоприемном модуле для различных типов оптического материала, из которого изготовлены пластины. Оранжевая точка на рис. 5 соответствует показателю преломления оптического материала для длины $\lambda = 1550$ нм при температуре $T \approx 294$ К.

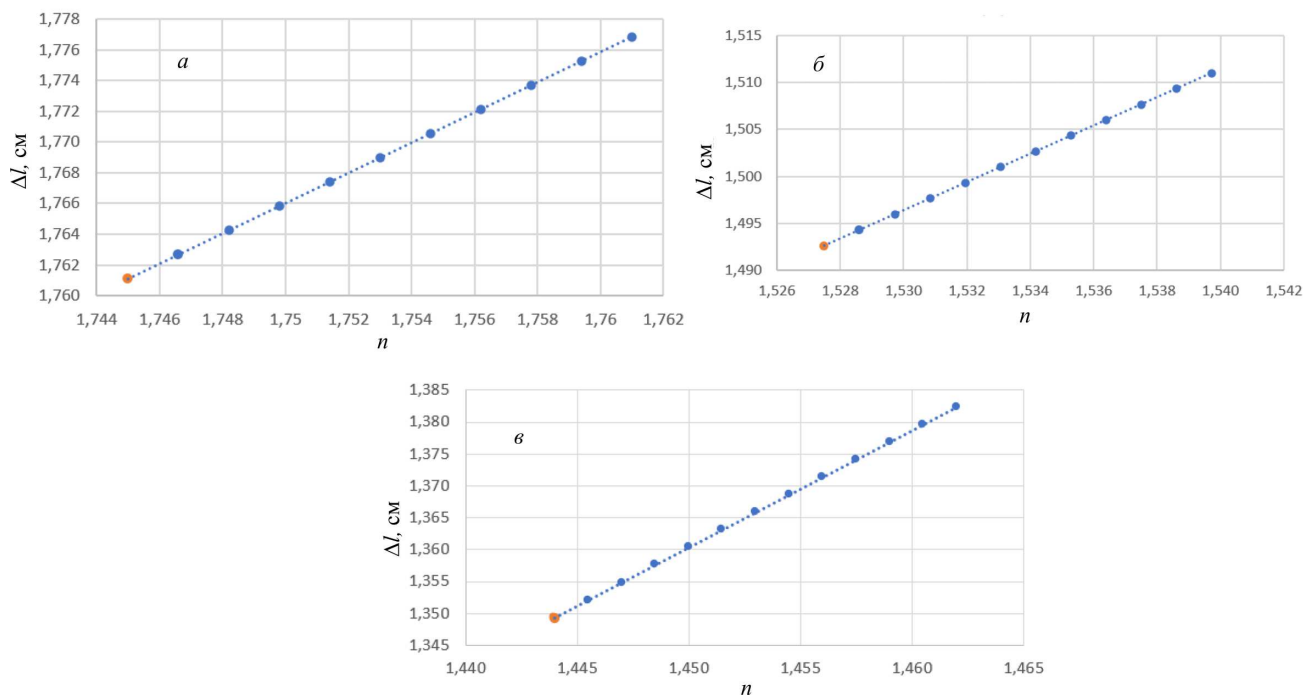


Рис. 5. Зависимость изменения $\Delta l x$ от изменения показателя преломления. Графикам *a*, *б* и *в* соответствует следующий материал: сапфир, кварц и стекло КУ-1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные предварительные результаты показывают возможность использования разработанной нами автоматической системы по подстройке положения оси лазерного излучения на фотоприемнике в необходимом диапазоне при передаче информации по воздушно-оптическому каналу связи. В работе приведен пример для пластин из трех материалов сапфира, кварца

и стекла КУ-1 максимального смещения оси лазерного излучения, которое составляет для сапфира порядка ± 19 мм при $d = 40$ мм. При увеличении значения d значение смещения будет увеличиваться. Было установлено, что при данном расположении пластин (угол наклона) из различных оптических материалов обеспечивается минимальный диапазон смещения оси лазерного излучения ± 12 мм, что больше на 4 мм по сравнению со смещениями в других разработках [8, 11, 12].

- [1] Petrov A.A., Grebenikova N.M. // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). **11118 LNCS**, 641. (2018).
- [2] Davydov V.V., Dudkin V.I., Velichko E.N., Karseev A.Yu. // Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskiy Zhurnal). **82**, N 3. 132. (2015).
- [3] Podstrigaev A.S., Rud V.Y. // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). **11118 LNCS**. 624. (2018).
- [4] Popovskiy N.I., Valiullin L.R. // Journal of Physics: Conference Series. **1695**, N 1. 012120. (2020).
- [5] Popovskiy N.I., Davydov V.V., Gureeva I.M. // ACM International: Conference Proceeding Series. **2021**. 527. (2021).
- [6] Reznikov B., Rodin S., Stepanenkov G., Vakorina D. // Proceedings of the 2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics. 158. (2022). (2016).
- [7] Авилов А.А. // Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. N 02. 11.
- [8] Cernaianu M. O., De Boisdeffre B., Ursescu D. et. al. // Romanian Reports in Physics. **68**. S349. (2016).
- [9] Gerbenescu M., Pandelea M., Achim A., Iliescu M. // U.P.B. Sci. Bull., Series A. **80**, N 3. 207. (2018).
- [10] Franczek E., Franczek W., Popiolek-Masajada A. // Applied Sciences. (2021). **11**, N 16. 7677.
- [11] Aman W., Al-Kuwari S., Muzzammil M. et. al. // Ad Hoc Networks. (2023). 142, 103114.
- [12] Karpathakis S.F.E., Dix-Matthews B.P., Gozzard D.R., Schediwy S.W. // Applied Optics. **62**, N 23. G85. (2023).

Development of an automatic system for adjusting the position of the laser radiation axis for an air communication channel

K.S. Nazarova^a, V.V. Davydov

*Institute of electronics and telecommunications, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
St. Petersburg 194064, Russia
E-mail: ^aknazarova0@ya.ru*

The necessity of developing optical systems for adjusting the position of the laser radiation axis on a photodetector module for an aerial fiber-optic communication line is substantiated. The design of an optical system for adjusting the axis of laser radiation on a photodetector module in a plane perpendicular to the laser radiation has been developed. The operation of an optical system for controlling the position of the laser radiation axis on the photosensitive layer of the photodetector is simulated. The optimal parameters of the system components are determined and control methods are proposed that allow achieving the necessary accuracy and stability of the radiation direction. Experimental studies aimed at correcting the position of the plates relative to the direction of the axis of laser radiation and changing their refractive index by changing the voltage are presented. The efficiency of the developed optical system is confirmed and the optimal parameters of its optical elements are determined.

PACS: 42.79.Sz

Keywords: optical system, semiconductor laser, laser radiation axis, quartz plates, refractive index, linear and quadratic approximations.

Received 25 May 2023.

Сведения об авторах

1. Назарова Ксения Сергеевна — студентка; e-mail: knazarova0@ya.ru.
2. Давыдов Вадим Владимирович — профессор; тел. (812) 249-44-14, e-mail: davydov_vadom66@mail.ru.