

УДК 654.02

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.32.1.005](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.32.1.005)

Метод моделирования интегрально-оптического модуля подсистемы аутентификации

О.А. Кулиш

*Краснодарское высшее военное орденов Жукова и Октябрьской Революции
краснознаменное училище имени генерала армии С.М. Штеменко, Краснодар,
Российская федерация*

Резюме: Для аутентификации коммутаторов второго уровня можно использовать код аутентификации, переданный отправителем информации получателю с помощью модуля аутентификации, встроенного в коммутатор. Для формирования кода аутентификации используется импульсный сигнал, энергия которого равна энергии фотона. Тракт передачи и приема кода аутентификации содержит устройство управления оптическим излучением на основе интегрально-оптического интерферометра. В одном из плеч интерферометра введена спиралевидная линия задержки, конструкция которой позволяет применить протокол BB84 для формирования кода аутентификации. Разработан метод моделирования интерферометра со спиралевидной линией задержки на базе интегральной оптики. Метод основан на трехмерном анализе канальных волноводов и не имеет ограничений на радиус изгиба и тип волновода. В методе применяется разбиение области сечения волновода на конечные элементы, замена волнового уравнения в цилиндрических координатах вариационной задачей. При решении матричной задачи получаются информация о модовом составе волновода и значения напряженности электрического поля в узлах разбиения. Зная распределение напряженности по сечению волновода можно рассчитать мощность моды и ее потери. Разработанным методом были рассчитаны допустимые радиусы изгиба линии задержки интерферометра для типовых интегрально-оптических канальных волноводов при фиксированной величине энергетических потерь.

Ключевые слова: оптическая связь, аутентификация, коммутаторы, интегральная оптика, интерферометр, линия задержки, численные методы, энергетические потери.

Для цитирования: Кулиш О.А. Метод моделирования интегрально-оптического модуля подсистемы аутентификации. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(1). Доступно по: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=922> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.005

Authentication Subsystem Integrated Optical Module Simulation Method

O.A. Kulish

*Krasnodar Higher Military Order of Zhukov and the October Revolution Red Banner School named
after Army General S.M. Shtemenko, Krasnodar, Russian Federation*

Abstract: To authenticate Layer 2 switches, the authentication code transmitted by the sender of the information to the recipient using the authentication module built into the switch can be used. To generate the authentication code, a pulse signal is used, the energy of which is equal to the energy of the photon. The path for transmitting and receiving the authentication code contains an optical radiation control device based on an integrated optical interferometer. In one of the interferometer arms, a spiral

delay line is introduced, which design allows the use of the BB84 protocol to generate an authentication code. A method for modeling an interferometer with a spiral delay line based on integrated optics has been developed. The method is based on a three-dimensional analysis of channel waveguides and has no restrictions on the bending radius and waveguide type. The method uses the division of the waveguide section region into finite elements, the replacement of the wave equation in cylindrical coordinates by a variational problem. When solving the matrix problem, information is obtained on the mode composition of the waveguide and the value of the electric field strength at the split nodes. Knowing the distribution of the strength over the cross-section of the waveguide, one can calculate the power of the mode and its losses. The developed method was used to calculate the permissible bending radius of the interferometer delay line for typical integrated-optical channel waveguides at a fixed value of energy losses.

Keywords: optical communication, authentication, switches, integrated optics, interferometer, delay line, numerical methods, energy losses.

For citation: Kulish O.A. Method of modeling the integrated optical module of the authentication subsystem. *Modeling, optimization, and information technology*. 2021;9(1). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=922> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.005 (In Russ).

Введение

В ходе информационного обмена между автоматизированными системами, пакеты передаваемой информации проходят через не защищенную, не авторизованную среду (сеть провайдера связи) и могут быть перехвачены и скопированы любым абонентом, подключенным к адресному пространству. Проверка коммутационного оборудования отправителя на подлинность не осуществляется, кроме способов, которые могут быть скомпрометированы (например, проверка IP адреса, MAC – адреса оборудования) [1]. Таким образом, существует угроза перехвата передаваемой информации и её последующего анализа из-за отсутствия технологии гарантированной верификации (проверки) взаимодействующего оборудования.

Проблема аутентификации в сети связи заключается в том, что отсутствует непосредственный контакт с аутентифицируемым пользователем. Чаще всего для аутентификации используются пароли, но при наличии определенных ресурсов у злоумышленника перехват или подбор пароля является делом времени даже при использовании одноразовых паролей [2].

Для устранения проблемы аутентификации коммутационного оборудования второго уровня модели OSI возможно использовать код аутентификации, сформированный при передаче случайной двоичной последовательности у отправителя и получателя информации с помощью модуля аутентификации, встроенного в коммутатор. В случае необходимости аутентификации коммутаторов при длине линии связи не больше 100 км соединение коммутаторов показано на Рисунке 1. Модуль SFP с встроенным модулем аутентификации коммутатора отправителя информации соединяется волоконно-оптическими линиями связи с модулями SFP с встроенными модулями аутентификации коммутаторов получателей информации. После формирования кода аутентификации при подключении коммутаторов обмен информацией происходит по тем же волоконно-оптическим линиям связи при отключенных модулях аутентификации. Для передачи кода аутентификации используется ослабленное лазерное импульсное излучение. Излучение нужно ослабить аттенуатором так, чтобы перехват информации злоумышленником приводил к потере сигналов. Тогда потерянные биты просто не будут участвовать в формировании кода аутентификации, и не дадут злоумышленнику никакой информации.

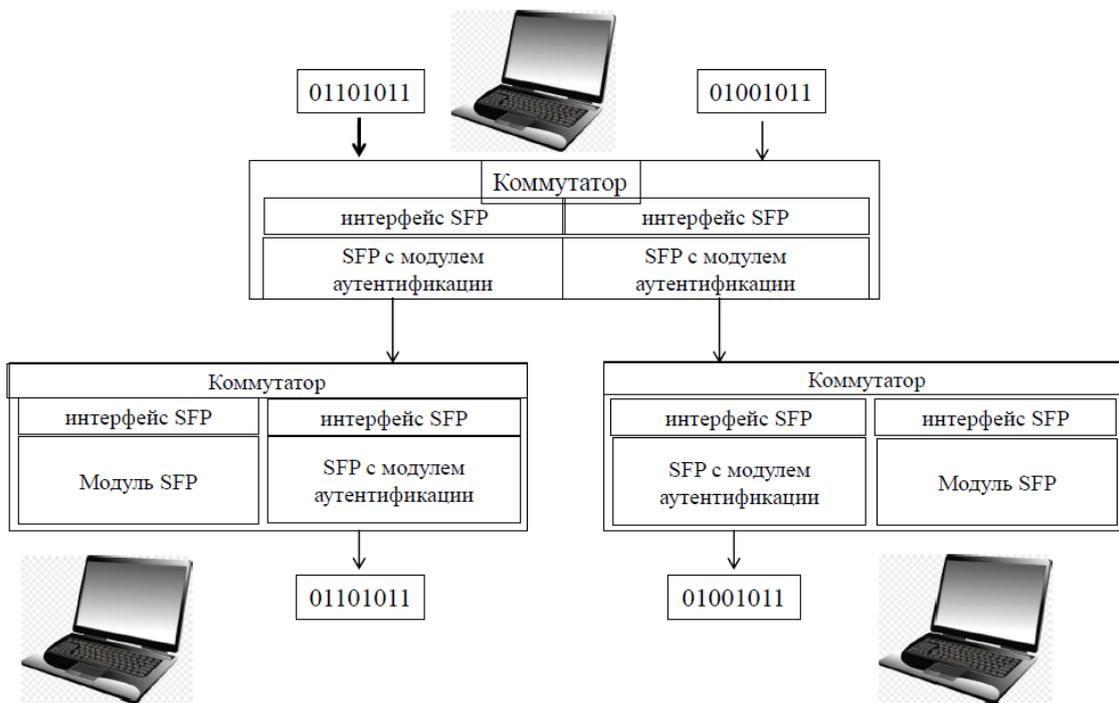


Рисунок 1 – Обобщенная модель аутентификации коммутатора
Figure 1 – Generalized Switch Authentication Model

Тракт передачи кода аутентификации содержит автоматизированное рабочее место оператора, источник ослабленных оптических сигналов, устройство управления оптическим излучением на основе интегрально-оптического интерферометра с фазовым модулятором, оптический соединитель. В состав тракта приема кода аутентификации входят оптический соединитель, интегрально-оптический поляризационный расщепитель, устройство управления оптическим излучением на основе интегрально-оптического интерферометра с фазовым модулятором, фотоприемник, автоматизированное рабочее место оператора. Система аутентификации включает оптическую линию связи, выполненную в виде одномодового оптического волокна и соединяющую передающую и принимающую части (Рисунок 2). Для формирования случайной двоичной последовательности в данном тракте передачи кода аутентификации можно использовать протокол BB84 или любой протокол с большим количеством базисов.

Принципиальная схема интегрально-оптического интерферометра для устройства управления оптическим излучением представлена на Рисунке 3. В одном из плеч интерферометра введена спиралевидная линия задержки, конструкция которой позволяет применить протокол BB84 для формирования кода аутентификации. Так как интегрально-оптические волноводы имеют высокие энергетические потери излучения, а при формировании кода аутентификации оптические сигналы должны иметь энергию, равную энергии фотона, то основное внимание при моделировании интерферометра должно быть уделено проектированию такой топологии волноводной структуры, которая обеспечивает минимальные потери.

Цель разработки модели: подбор радиуса изгиба линии задержки интерферометра для различных типов волноводов и фиксированной величины радиационных потерь.

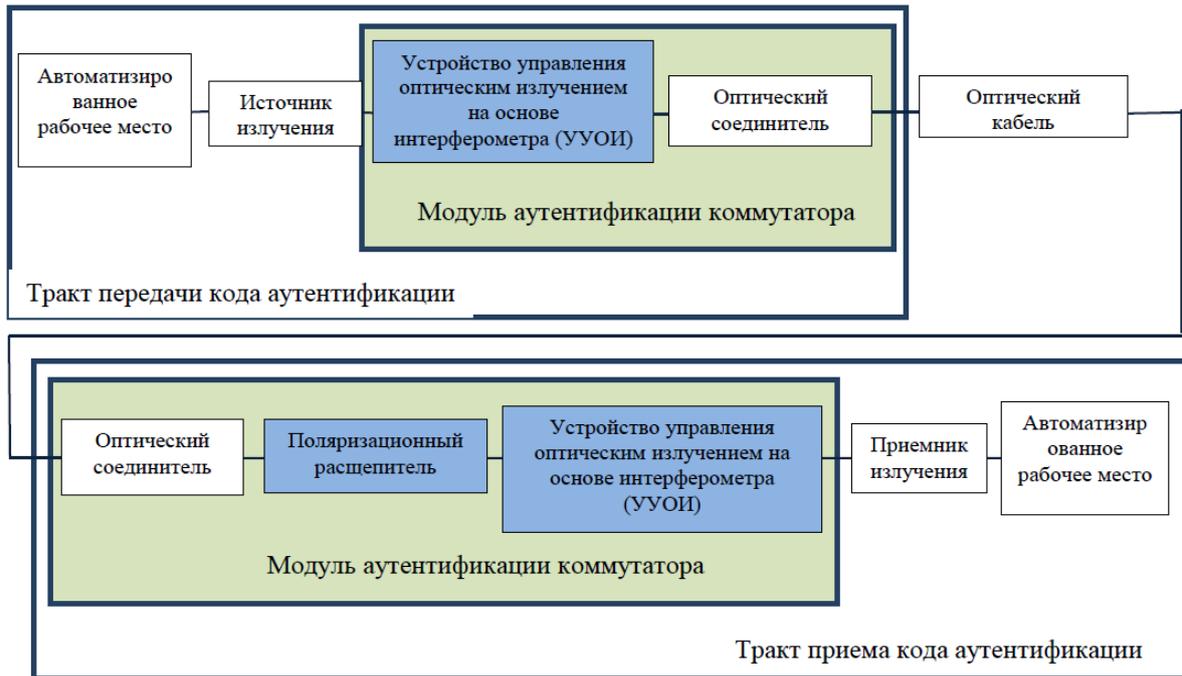


Рисунок 2 – Схема трактов передачи и приема кода аутентификации
 Figure 2 – Diagram of authentication code transmission and reception paths

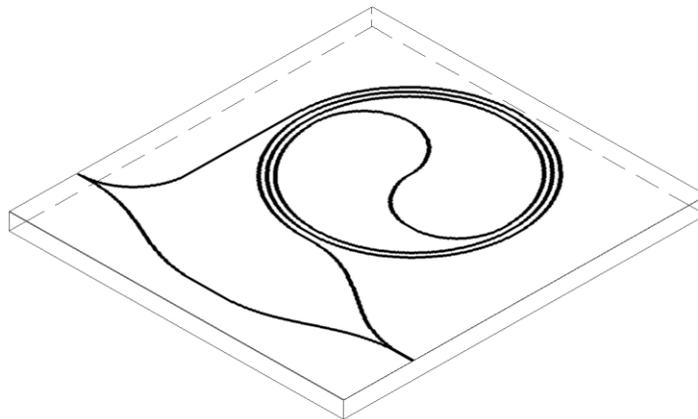


Рисунок 3 – Схема интегрально-оптического интерферометра
 Figure 3 – Integrated optical interferometer diagram

Материалы и методы

Расчет параметров интерферометра предполагает электродинамический расчет элементов его волноводной структуры. Известен ряд методов расчета потерь на изгибах оптических волноводов. Подавляющее большинство описанных в специальной литературе методов имеет ряд ограничений, в первую очередь на радиус изгиба и тип волновода (он должен быть слабонаправляющим) [3,4]. Расчеты выполнялись методиками, не обладающими никакими ограничивающими предположениями.

Диэлектрические волноводы не могут направлять электромагнитную энергию по изгибам без потерь мощности на излучение. Практически потери на изгибе могут быть малы, если радиус кривизны изгиба достаточно велик, и велики, если волновод сильно

изогнут. Поле вне сердцевины волновода спадает экспоненциально в поперечном направлении от оси волновода. Для изогнутого волновода плоскости постоянной фазы принимают форму, которая схематически показана на Рисунке 4. На некотором критическом расстоянии скорость фазового фронта равняется скорости плоской волны в среде, окружающей волновод. Поэтому часть поля отделяется от поля направляемой моды и излучается в пространство.

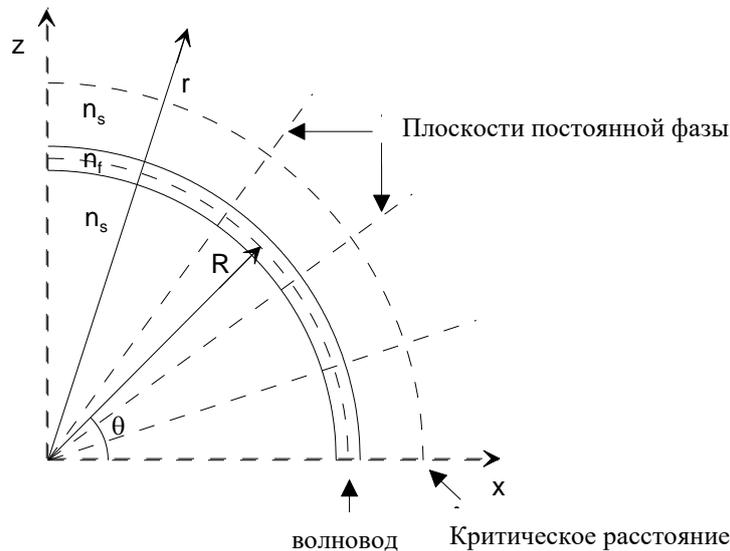


Рисунок 4 – Иллюстрация физического механизма потерь на излучение в изогнутых планарных волноводах (полярная система координат)

Figure 4 – Illustration of the physical mechanism of radiation loss in curved planar waveguides (polar coordinate system)

Необходимость проведения трехмерного анализа волновода обусловлена тем, что фактически анализируется тот волновод, который может быть запланирован для использования в устройстве. Приращение показателя преломления волноведущего канала для разных технологий использовать для расчета потерь планарных конфигураций можно лишь исключительно с предварительным применением метода эффективного показателя преломления, который сводит трехмерную задачу к двумерной. В противном случае получаются некорректные результаты – величины потерь значительно более низкие, чем истинные. Применение трехмерного конечно-элементного анализа позволяет получить прямое решение исходной задачи без применения метода эффективного показателя преломления.

Точного решения задача определения потерь на изгибе в трехмерном волноводе не имеет, поэтому возникает необходимость провести анализ электромагнитного поля в изгибе световода подходящим численным методом. Рассмотрим решение данной задачи методом конечных элементов [5].

Уравнения Максвелла с учетом гармонической зависимости \vec{E} и \vec{H} от t запишутся в виде:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -i\omega\mu_0\vec{H} \\ \nabla \times \vec{H} &= i\omega\varepsilon_0 n^2 \vec{E} \\ \nabla \cdot \vec{H} &= 0 \\ \nabla \cdot \vec{E} &= 0\end{aligned}\quad (1)$$

Для анализа изгибов волноводов удобнее использовать цилиндрические координаты r , θ , z [6]. Ввод цилиндрической системы координат для изгиба волновода представлен на Рисунке 5.

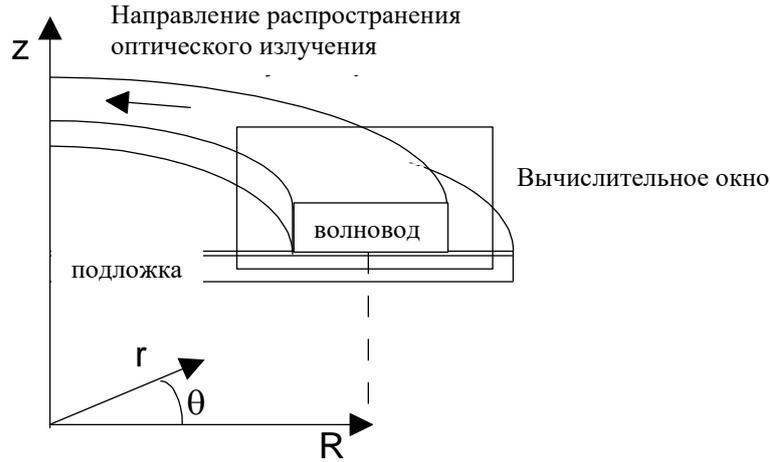


Рисунок 5 – Трехмерный оптический волновод в цилиндрической системе координат
Figure 5 – 3D optical waveguide in cylindrical coordinate system

При использовании формулы ротора в цилиндрических координатах и компоненты \vec{E} в виде $E_r(r, \theta, z) = E_r(r, z) \exp(-i\nu\theta)$, $E_\theta(r, \theta, z) = E_\theta(r, z) \exp(-i\nu\theta)$, $E_z(r, \theta, z) = E_z(r, z) \exp(-i\nu\theta)$, где ν – угловая константа распространения, из 1-го уравнения Максвелла полагаются выражения для каждой компоненты ротора:

$$\begin{aligned}-\frac{i\nu}{r} E_z - \frac{\partial E_\theta}{\partial z} &= -i\omega\mu_0 H_r \\ \frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} &= -i\omega\mu_0 H_\theta \\ \frac{1}{r} \frac{\partial(rE_\theta)}{\partial r} + \frac{i\nu}{r} E_r &= -i\omega\mu_0 H_z.\end{aligned}\quad (2)$$

Из 2-го уравнения Максвелла получим формулы:

$$\begin{aligned}-\frac{i\nu}{r} H_z - \frac{\partial H_\theta}{\partial z} &= i\omega\varepsilon_0 n^2 E_r \\ \frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} &= i\omega\varepsilon_0 n^2 E_\theta \\ \frac{1}{r} \frac{\partial(rH_\theta)}{\partial r} + \frac{i\nu}{r} H_r &= i\omega\varepsilon_0 n^2 E_z.\end{aligned}\quad (3)$$

Применение формулы для дивергенции в цилиндрических координатах преобразует 3-е и 4-ое уравнения Максвелла к виду:

$$\begin{aligned} E_{\theta} &= -i \frac{1}{\nu} \left(\frac{\partial(rE_r)}{\partial r} + r \frac{\partial E_z}{\partial z} \right) \\ H_{\theta} &= -i \frac{1}{\nu} \left(\frac{\partial(rH_r)}{\partial r} + r \frac{\partial H_z}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Из уравнений (2) и (4) выражается H_z компонента поля [7]:

$$\begin{aligned} H_z &= \frac{\nu}{\omega \mu_0 r} \left(-E_r + \frac{r}{\nu^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E_r}{\partial r} \right) \right) + \\ & \frac{\nu}{\omega \mu_0 r} \left(2 \frac{r}{\nu^2} \frac{\partial E_r}{\partial r} + \frac{1}{\nu^2} E_r + \frac{1}{\nu^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial E_z}{\partial z} \right) \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Аналогично из уравнений (3) и (4) получается выражение для E_z [7]:

$$\begin{aligned} E_z &= \frac{\nu}{\omega \epsilon_0 n^2 r} \left(H_r - \frac{r}{\nu^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial H_r}{\partial r} \right) \right) - \\ & \frac{\nu}{\omega \epsilon_0 n^2 r} \left(2 \frac{r}{\nu^2} \frac{\partial H_r}{\partial r} + \frac{1}{\nu^2} H_r + \frac{1}{\nu^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial H_z}{\partial z} \right) \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Так как E_z компонента поля равна нулю, получается волновое уравнение в цилиндрических координатах для ТЕ - моды:

$$p \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + p \frac{3}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} - p \frac{\nu^2 - 1}{r^2} \varphi + p \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + q k_0^2 \varphi = 0, \quad (7)$$

где $\varphi = E_r$, $p = 1$, $q = n^2$.

Аналогично выводится уравнение для ТМ- моды, если обозначить $\varphi = H_r$, $p = 1/n^2$, $q = 1$. При замене $\varphi = u/r$ уравнение (5) переписывается в более компактной форме [8]:

$$p \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) - p \frac{\nu^2}{r^2} u + p \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + q k_0^2 u = 0. \quad (8)$$

Для решения данного уравнения методом конечных элементов производится разбиение поперечного сечения реального оптического волновода на некоторое конечное число простых симплекс-элементов, внутри которых поля представляются полиномами, а показатель преломления считается постоянным [9]. Наиболее часто для такого разбиения применяют триангуляцию (разделение на треугольники). Для этого метода существуют программы триангуляции, встроенные в системы САПР.

Далее применяется вариационный метод Релея-Ритца. При этом решение данного волнового уравнения в цилиндрических координатах заменяется вариационной задачей, т.е. с помощью вариационного исчисления уравнению (8) ставится в соответствие на области Ω функционал F :

$$F = \iint_{\Omega} \left(q k_0^2 u^* u - p \frac{\partial u^*}{\partial r} \frac{\partial u}{\partial r} - p \frac{\partial u^*}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} - p \frac{\nu^2}{r^2} u^* u \right) r dr dz. \quad (9)$$

Функция на каждом элементе разбиения представляется в виде аппроксимации:

$$u = \{N\} \{u\}, \quad (10)$$

где $\{u\} = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \ u_5 \ u_6]^T$ – вектор значений функции u в узлах элемента, $\{N\} = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4 \ N_5 \ N_6]$ – вектор весовых функций второго порядка,

введенных через L – координаты для треугольных элементов.

Аппроксимация функции $u = \{N\}\{u\}$ подставляется в функционал F , находятся частные производные по значениям u_i^* и приравниваются к нулю. При этом функционал рассматривается, как функция коэффициентов u_i^* . Получается система уравнений:

$$\frac{\partial F}{\partial u_i^*} = 0, i = 1 \dots n. \quad (11)$$

Если ввести коэффициенты:

$$[K] = \int_e \left[q_e k_0^2 \{N\}\{N\}^T - p_e \frac{\partial \{N\}}{\partial r} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial r} - p_e \frac{\partial \{N\}}{\partial z} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial z} \right] r dr dz$$

$$[M] = \int_e \int p_e \frac{1}{r} \{N\}\{N\}^T dr dz,$$
(12)

то система уравнений приводится к виду:

$$[K]\{u\} - v^2 [M]\{u\} = \{0\}. \quad (13)$$

Полученная система уравнений является задачей на собственные значения. Матрицы $[K]$ и $[M]$ называются матрицами жесткости для одного элемента. Эти матрицы формируются из коэффициентов при u_i . Матрица, полученная данным методом, содержит в себе информацию о распределении поля только в пределах конкретного элемента. Для нахождения поля на выбранной области, включающей в себя все элементы разбиения, необходимо методом ансамблирования составить общую матрицу, которая определяла бы значения электрического поля E на всей области распределения [10].

Результаты

При решении матричной задачи получается информация о модовом составе волновода и значения напряженности электрического поля в узлах разбиения. Зная распределение напряженности по сечению волновода можно рассчитать мощность моды и ее потери.

Для расчетов применялись следующие параметры: приращение показателя преломления волноведущего слоя $\Delta n=0,1$, $\Delta n=0,05$, $\Delta n=0,01$, $\Delta n=0,002$; длина волны излучения $\lambda=1,3$ мкм, $\lambda=1,5$ мкм; ширина волновода 1,5 мкм; показатель преломления подложки 1,6; величина радиационных потерь в интегрально-оптическом волноводе 0,01 Дб/см. Расчеты проводились в среде Maple. Входные данные имели точность порядка 10^{-4} , точность расчетов в программе Matlab составляла 10^{-8} . Условие выхода из эксперимента: при уплотнении сетки разбиения вычислительного окна разность между итерациями радиуса изгиба имеет порядок 10^{-8} .

Был произведен расчет зависимости величины потерь от радиуса изгиба волновода при варьируемой величине приращения показателя преломления волноведущего слоя. Результаты расчетов приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость допустимого радиуса изгиба волновода от приращения показателя преломления волноведущего слоя
Table 1 – Dependence of the allowable bending radius of the waveguide on the increment of the refractive index of the waveguide layer

Приращение показателя преломления волноведущего слоя	Допустимый радиус изгиба, мкм	
	Длина волны 1,3 мкм	Длина волны 1,5 мкм
0,1	150	170
0,05	470	600
0,01	5200	6500
0,002	42000	55000

На основе описанного метода были рассчитаны потери в трехмерном погруженном волноводе с симметричным профилем и в гребенчатом волноводе. Результаты расчета отражены в Таблице 2.

Таблица 2 – Допустимый радиус изгиба волновода типовых интегрально-оптических канальных волноводов (уровень потерь – 0,01 дБ/см)
Table 2 – Allowable bending radius of waveguide of typical integral optical channel waveguides (loss level - 0.01 dB/cm)

Тип канального волновода	Допустимый радиус изгиба, мкм	
	Длина волны 1,3 мкм	Длина волны 1,5 мкм
гребневый	400	700
заглубленный с симметричным профилем	6000	9000

Обсуждение

В результате проведения численного эксперимента с математической моделью был сделан вывод, что величина потерь в изогнутых волноводах существенно зависит от приращения показателя преломления волноведущего слоя по отношению к подложке, на которой сформирован волновод, и от типа самого волновода, определяемого технологией его изготовления.

Оценка допустимых потерь в изогнутых волноводах производилась по следующим соображениям. Дальность для однонаправленной однофотонной связи составляет в настоящее время величину порядка 100 км. С учетом потерь одномодовых волокон $\sim 0,2$ дБ/км ($\lambda = 0,5$) потери, вносимые на стороне приемника и передатчика должны быть как минимум на порядок меньше общих потерь линии связи, так как являются просто аддитивной составляющей общего бюджета потерь волоконно-оптической линии.

Потери световой энергии в интегрально-оптической схеме складываются из: потерь на рассеяние самих микроволноводов, обладающих не идеально четкой границей и неоднородностями в материале волноведущего слоя и смежных областях; радиационных потерь на изгибе; потерь на стыковку внешних портов схемы с оптическим волокном.

Минимальный уровень потерь мощности за счет рассеяния для известных в настоящее время интегральных технологий составляет 0,1 дБ/см, потери на стыковку составляют 0,5 дБ. Таким образом, при необходимой длине линии задержки 0,5 м потери

в рассматриваемой выше схеме должны составлять 6 дБ при условии пренебрежимо малой по отношению к этому значению величине радиационных потерь – порядка 0,01 дБ/см.

Как видно из Таблицы 1, минимальный допустимый радиус изгиба волноводов для построения приемо-передающего устройства составляет величину 5200 мкм ($\lambda=1,3$ мкм) и 6500 мкм ($\lambda=1,5$ мкм) и достигается для величины приращения показателя преломления не менее, чем 0,01. При этом линейные размеры интерферометра составляют величину 4×4 см ($\lambda=1,3$ мкм) и 5×5 см ($\lambda=1,5$ мкм). Потери на длине волны 1,5 мкм в среднем на 30% больше, чем потери на длине волны 1,3 мкм. Следует отметить, что применение данных расчетов к канальным волноводам возможно исключительно после использования метода эффективного показателя преломления, который сводит исходную задачу к анализу планарного волновода с приращением показателя преломления волноведущего слоя Δn .

На основе данных Таблицы 2 можно сделать выводы: для гребневых волноводов допустимая величина потерь 0,01 дБ/см достигается при радиусе изгиба 400 мкм при перепаде показателей преломления волноведущего слоя и подложки 0,1; для канальных погруженных волноводов указанная величина потерь достигается при радиусе изгиба 6000 мкм при перепаде показателей преломления волноведущего слоя и подложки 0,02 при длине волны излучения 1,3 мкм. При длине волны 1,5 мкм для достижения тех же потерь радиус изгиба должен быть на 50% больше.

Заключение

Таким образом, разработан метод моделирования интегрально-оптического модуля подсистемы аутентификации, построена модель интерферометра со спиралевидной линией задержки на базе интегральной оптики. Метод основан на трехмерном анализе канальных волноводов и не имеет ограничений на радиус изгиба и тип волновода. В методе применяется разбиение области сечения волновода на конечные элементы, замена волнового уравнения в цилиндрических координатах вариационной задачей. В результате решения полученной матричной задачи на собственные значения были рассчитаны допустимые радиусы изгиба линии задержки интерферометра для типовых интегрально-оптических канальных волноводов при фиксированной величине энергетических потерь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов А.Е., Максимов Р.В., Савицкий О.К. Защита и безопасность ведомственных интегрированных инфокоммуникационных систем. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015.
2. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. 5-е изд. СПб.: Питер, 2012.
3. Huang W. Analysis of Folded Erbium-Doped Planar Waveguide Amplifiers by the Method of Lines. *Journal of Lightwave Technol.* 1999;12(17):2658-2664.
4. Lowe D., Syms R.A. Layout Optimization for Erbium-Doped Waveguide Amplifiers. *Journal of Lightwave Technol.* 2002;3(20):454-462.
5. Deng H., Deng H., Guang H. Investigation of 3-D Semivectorial Finite-Difference Beam Propagation Method for Bent Waveguides. *Journal of Lightwave Technol.* 1998;5(16):915-922.
6. Yamauchi J., Saito O. Polarization Dependence of Pure Bending Loss in Slab Optical Waveguides. *IEICE Trans. Electron.* 1996;6(E79-C):870-873.

7. Berglung W., Gopinath A. WKB Analysis of Bend Losses in Optical Waveguides. *Journal of Lightwave Technol.* 2000;8(18):1161-1165.
8. Rivera M. A Finite Difference BPM Analysis of Bent Dielectric Waveguides. *Journal of Lightwave Technol.* 1995;2(13):233-238.
9. Bienstman P., Six E., Roelens M. Calculation of Bending Losses in Dielectric Waveguides Using Eigenmode Expansion and Perfectly Matched Layers. *IEEE Photonics Technology Letters.* 2002;2(14):164-166.
10. Deck R.T., Mirkov M. Determination of Bending Losses in Rectangular Waveguides. *Journal of Lightwave Technol.* 1998;9(16):1703-1714.

REFERENCES

1. Davydov A.E., Maksimov R.V., Savitsky D.C. Protection and security of departmental integrated information communication systems. St. Petersburg: Publishing House Polytechnic. un-ta, 2015.
2. Tanenbaum E., Weatherall D. Computer networks. 5th ed. St. Petersburg: Peter, 2012.
3. Huang W. Analysis of Folded Erbium-Doped Planar Waveguide Amplifiers by the Method of Lines. *Journal of Lightwave Technol.* 1999;12(17):2658-2664.
4. Lowe D., Syms R.A. Layout Optimization for Erbium-Doped Waveguide Amplifiers. *Journal of Lightwave Technol.* 2002;3(20):454-462.
5. Deng H., Deng H., Guang H. Investigation of 3-D Semivectorial Finite-Difference Beam Propagation Method for Bent Waveguides. *Journal of Lightwave Technol.* 1998;5(16):915-922.
6. Yamauchi J., Saito O. Polarization Dependence of Pure Bending Loss in Slab Optical Waveguides. *IEICE Trans. Electron.* 1996;6(E79-C):870-873.
7. Berglung W., Gopinath A. WKB Analysis of Bend Losses in Optical Waveguides. *Journal of Lightwave Technol.* 2000;8(18):1161-1165.
8. Rivera M. A Finite Difference BPM Analysis of Bent Dielectric Waveguides. *Journal of Lightwave Technol.* 1995;2(13):233-238.
9. Bienstman P., Six E., Roelens M. Calculation of Bending Losses in Dielectric Waveguides Using Eigenmode Expansion and Perfectly Matched Layers. *IEEE Photonics Technology Letters.* 2002;2(14):164-166.
10. Deck R.T., Mirkov M. Determination of Bending Losses in Rectangular Waveguides. *Journal of Lightwave Technol.* 1998;9(16):1703-1714.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кулиш Ольга Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры математики (и математических основ криптографической защиты информации), Краснодарское высшее военное орденов Жукова и Октябрьской Революции краснознаменное училище имени генерала армии С.М. Штеменко, Краснодар, Российская Федерация.

e-mail: culish_olga@mail.ru

ORCID: [0000-0003-2295-9792](https://orcid.org/0000-0003-2295-9792)

Olga A. Kulish, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Mathematics (and the mathematical foundations of cryptographic information protection), Krasnodar Higher Military Order of Zhukov and the October Revolution Red Banner School named after Army General S.M. Shtemenko, Krasnodar, Russian Federation.