

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ «СМАРТЛИНК СОЕДИНЕНИЯ»

В.С. Никитин¹, Э.И. Семёнов², А.В. Солостин¹, В.Г. Шаров², С.В. Чайка¹

¹ *Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технологический центр информационной физики «Интрофизика» (ООО «НТЦ «Интрофизика»), Рыбинск, Россия,*

² *Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва (РГАТУ имени П.А. Соловьёва), Рыбинск, Россия*

Аннотация

Математическая модель «смартлинк соединения» дополнена в части моделирования прохождения сигналов по физическим каналам, учтено размытие сигналов, а также несколько видов потерь интенсивности сигналов при их прохождении по световодам. На основании построенной математической модели разработано программное обеспечение, реализующее и моделирующее функции коммутации каналов и самовосстановления соединения. В ходе проведения экспериментов с использованием разработанного программного обеспечения были изучены свойства самовосстановления «смартлинк соединений», а также получены оптимальные характеристики для изготовления многоканальных оптических делителей сигналов.

Ключевые слова: оптоволоконные соединения, массивы, лазеры, фотодиоды.

Цитирование: Никитин, В.С. Моделирование работы «смартлинк соединения» / В.С. Никитин, Э.И. Семёнов, А.В. Солостин, В.Г. Шаров, С.В. Чайка // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 1. – С. 64-72. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-64-73.

Введение

В современных условиях при проектировании высокопроизводительных вычислительных систем (сложных микросхем, многопроцессорных суперкомпьютерных систем) всё больше внимания уделяется проблеме организации межсоединений [1–3]. Межсоединения определяют организацию обмена информацией между узлами сети и могут быть описаны такими характеристиками, как физическая среда, топология сети, используемые протоколы передачи данных. Если говорить о физической среде, то одним из перспективных направлений развития межсоединений являются многоканальные оптоволоконные соединения.

Основная причина, по которой соединения такого типа до сих пор не получили массового распространения, – это сложность монтажа. Важно, чтобы при монтаже была выполнена строгая юстировка компонентов оптоволоконного соединения (источника и приёмника сигнала, а также оптического канала) друг относительно друга. Процедура юстировки и монтажа требует высокоточного, дорогостоящего оборудования. Кроме того, оптоволоконное соединение не обладает достаточной устойчивостью к внешним воздействиям: смещение компонентов друг относительно друга, а также чрезмерный излом оптоволоконного кабеля могут привести к нарушению связи, восстановление которой потребует значительных затрат. Если говорить о многоканальных оптоволоконных соединениях, то увеличение количества каналов ведёт не только к росту производительности соединения, но и к усложнению его монтажа. Наиболее распространённые сегодня многоканальные оптоволоконные соединения – это активные оптические кабели и высокоплотные параллельные оптоволоконные соединения. Разработчики таких соединений решают в основном технологические проблемы высокоточного монтажа, стремясь разместить как можно больше каналов в корпусах небольших размеров.

Возможным альтернативным решением проблемы построения многоканальных оптоволоконных соединений является технология передачи данных по интеллектуальному многоканальному оптоволоконному соединению [4]. В данной статье приводятся результаты исследования построенной на основе предложенной технологии системы передачи данных – «смартлинк соединения».

Теоретические исследования «смартлинк соединения» выполнены в работах [5, 6, 7]. В настоящей работе математическая модель дополнена в части моделирования прохождения сигналов по физическим каналам, учтено размытие сигналов, а также несколько видов потерь интенсивности сигналов при их прохождении по световодам. На основании полученной математической модели разработано программное обеспечение, реализующее и моделирующее функции коммутации каналов и самовосстановления соединения. В ходе проведения экспериментов с использованием разработанного программного обеспечения были изучены свойства самовосстановления «смартлинк соединений», а также получены оптимальные характеристики для изготовления многоканальных оптических делителей сигналов.

Основной целью разрабатываемой математической модели соединения, описываемой в статье, является реализация регенеративных возможностей полнодуплексного «смартлинк соединения», т.е. автоматического самовосстановления каналов связи при возникновении нештатных ситуаций без участия оператора и проведения дополнительных мероприятий юстировки соединения. Современными способами восстановления связи в аварийных ситуациях являются традиционные способы, ориентированные в основном на резервирование трактов (линейное, кольцевое и пр.) – предварительное введение в систему определённой избыточности в виде независимых путей передачи информации. Реализация свойства реге-

нерации «смартлинк соединения» обеспечивается аппаратно на основании принципов технологии, предлагаемой в работе [4], без организации дополнительного резервирования оптических трактов.

Следует обратить внимание на то, что предлагаемая к рассмотрению в данной работе модель является улучшенным и более развитым вариантом модели передачи данных для «смартлинк соединения», описанной в работе [6]. Авторы считают, что сама по себе модель и подход, применённый при её построении, могут представлять определённый научный интерес и быть использованы для моделирования работы других типов многоканальных оптоволоконных соединений.

1. Схема «смартлинк соединения»

Общая схема «смартлинк соединения» показана на рис. 1.

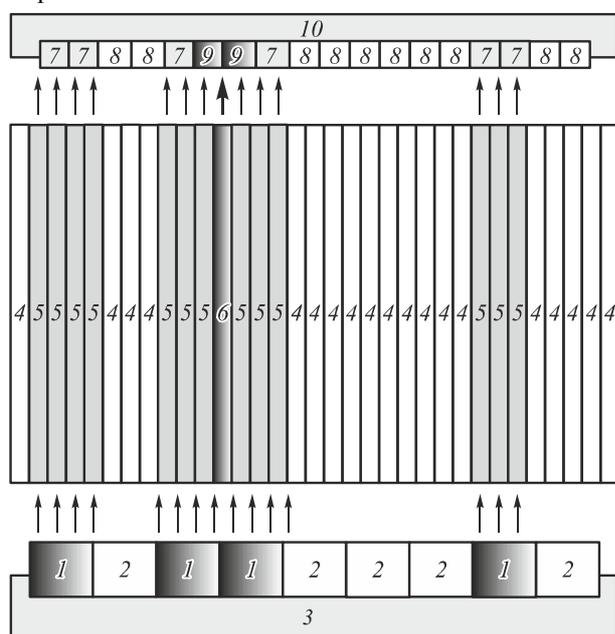


Рис. 1. Схема прохождения сигналов:

- 1 – активированный источник света;
- 2 – неактивированный источник света; 3 – матрица излучателей; 4 – неактивированные волокна оптошины;
- 5 – активированные волокна оптошины; 6 – волокна оптошины, в которые были направлены несколько лучей света;
- 7 – активированные фотодиоды;
- 8 – неактивированные фотодиоды; 9 – активированные фотодиоды, принявшие сигнал из волокон 6;
- 10 – матрица фотоприёмников

На входы лазерной матрицы 3 подаются электрические импульсы от управляющей микросхемы источника, которые модулируют излучение некоторого множества лазеров 1 (источников сигналов). Это излучение (сигналы 5 и 6) по оптошине (каналу передачи данных) поступает к матрице фотодиодов 10 и активирует некоторое множество фотодиодов 7 и 9 (приёмников сигналов). Активированные фотодиоды генерируют поток электрических импульсов к управляющей микросхеме приёмника.

При соединении оптошину подключают к матрицам передатчика и приёмника достаточно произволь-

но, совмещая лишь оптические области матриц и оптошины путём установки концов оптошины в оптические разъёмы микросхем приёмника и передатчика. Поэтому зная только множество активированных фотодиодов матрицы-приёмника, невозможно определить, каким из лазеров был испущен активировавший эти фотодиоды сигнал. Один из основных принципов рассматриваемой системы заключается в том, чтобы до начала передачи данных выполнить коммутацию логических каналов: установить соответствие между каждым лазером и активируемыми этим лазером фотодиодами, а также задействованными для передачи сигналов каналами.

Процедура коммутации логических каналов производится однократно до начала передачи данных и никак не влияет на скорость передачи в дальнейшем. При обнаружении нарушения связи, например, вследствие частичного повреждения оптошины или её смещения относительно матриц приёмника и передатчика процедура коммутации каналов может быть выполнена повторно без вмешательства оператора.

2. Математическая модель «смартлинк соединения»

Ключевыми компонентами математической модели «смартлинк соединения» являются:

- множество источников сигналов:
 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_{n_1}\}$, где n_1 – общее количество источников сигналов;
- множество физических каналов:
 $K = \{k_1, k_2, \dots, k_{n_2}\}$, где n_2 – общее количество физических каналов;
- множество приёмников сигналов:
 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{n_3}\}$, где n_3 – общее количество приёмников сигналов.

Предполагается, что количество физических каналов и приёмников сигналов избыточно относительно количества источников сигналов, т. е. $n_1 < n_2$ и $n_1 < n_3$.

Источники сигнала $l \in L$ активируются под влиянием внешнего управляющего воздействия. Пусть каждое управляющее воздействие активирует некоторое подмножество источников сигнала $L' = \{l'_1, l'_2, \dots, l'_{n_1}\}$. При активации некоторого подмножества источников сигналов $L' \subset L$ мощностью n'_1 , где $1 \leq n'_1 \leq n_1$, испускается некоторое множество сигналов $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{n'_1}\}$.

Каждый сигнал $s_i \in S$ ($1 \leq i \leq n'_1$), характеризующийся интенсивностью v_i , направляется в некоторое подмножество каналов $K_i = \{k'_1, k'_2, \dots, k'_{n_2}\}$, где $0 \leq n_{2,i} \leq n_2$ и $K_i \subset K$. Формируется множество $K^n = \{K_1^n, K_2^n, \dots, K_{n_1}^n\}$, в котором каждый элемент $K_i^n \in K^n$ представляет собой подмножество каналов, в которые был направлен сигнал $s_i \in S$.

При этом не исключается возможность взаимного пересечения нескольких множеств $K_i \in K^* (1 \leq i \leq n_1)$, т.е. могут существовать такие f и g , для которых $K_f \cap K_g \neq \emptyset$, где $K_f \in K^*, K_g \in K^*, 1 \leq f, g \leq n_1$ и $f \neq g$. Это означает, что сигналы $s_f \in S$ и $s_g \in S$ полностью или частично были направлены в одни и те же каналы множества K .

Таким образом, в каждый канал $k_j \in K (1 \leq j \leq n_2)$ поступает сигнал некоторой интенсивности v_j и формируется множество всех задействованных каналов $K' = \{k'_1, k'_2, \dots, k'_{n'_2}\}$, где $0 \leq n'_2 \leq n_2$ и $K' \subset K$.

Для оптического кабеля стандарта G.651.1 на возможность распознавания сигнала интенсивности v_j , поступающего в каждый из каналов $k_j \in K'$, влияют несколько факторов:

- размытие сигнала;
- естественное затухание сигнала;
- затухание рассеяния;
- затухание поглощения;
- затухание на изгибе.

На размытие сигналов на выходе из каналов влияют несколько параметров, но ключевым является угол θ . Именно углом вхождения в канал испускаемые источниками сигналы отличаются друг от друга. На рис. 2 показан процесс прохождения сигнала по оптическому каналу.

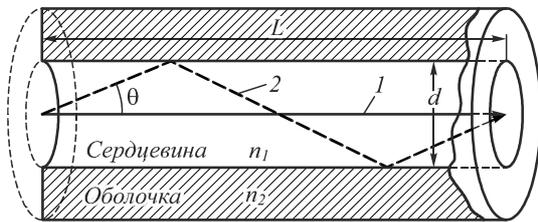


Рис. 2. Прохождение сигналов в оптическом канале: 1 – быстрая мода; 2 – медленная мода

Очевидно, сигнал, направленный под нулевым углом ($\theta = 0^\circ$) к оси канала, дойдёт до конца канала, пройдя расстояние H быстрее, чем сигнал, направленный под ненулевым углом. Чем больше разность углов между двумя сигналами, тем больше временная задержка между их прохождением и тем более размытыми они являются. Величину размытия сигналов, как правило, принято сопоставлять с их периодом. Например, считается, что если размытие сигналов превышает $1/4T$, то вероятность их корректного распознавания существенно снижается.

Коэффициент размытия сигнала на выходе из канала определяется по формуле:

$$k_{разм} = t_H / T_s,$$

где t_H – время прохождения сигнала по каналу, T_s – период сигнала.

Время прохождения сигнала по каналу определяется по формуле:

$$t_H = H/c + \Delta\tau, \tag{1}$$

где $\Delta\tau$ зависит от угла θ следующим образом [8]:

$$\Delta\tau = \frac{H \cdot (n_1 - n_2)}{c} \cdot \left(1 - \frac{\pi}{V}\right) \cdot \frac{\Theta}{\Theta_{max}},$$

$$\text{где } V = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot n_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta},$$

$$\text{где } \Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2 \approx (n_1 - n_2) / n_1,$$

где a – радиус сердцевины оптического канала, λ – длина волны, H – длина канала, м.

Очевидно, что существует такое предельное значение коэффициента размытия $k_{разм, max}$, при котором дальнейшее его повышение приведёт к появлению на выходе из канала чрезмерно размытых сигналов.

От угла θ также зависит естественное затухание сигнала, при его прохождении по физическому каналу, т.к. увеличение угла θ ведёт к увеличению расстояния, которое должен пройти сигнал. Также необходимо учитывать потери интенсивности сигнала при его отражении от оболочки (чем больше отражений, тем больше потери). Существует некоторый угол θ_{max} , являющийся предельным, превышение которого означает, что сигнал, вошедший в канал под таким углом, будет полностью поглощён оболочкой. Величина этого угла определяется из формулы для числовой апертуры световода:

$$NA = \sin \theta_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

где n_1 – коэффициент преломления сердцевины канала, n_2 – коэффициент преломления оболочки канала.

Если, например, $n_1 = 1,63$, $n_2 = 1,41$, то $\theta_{max} = 28^\circ$. Это означает, что существуют две граничные ситуации:

- самый «быстрый» сигнал с минимальными потерями интенсивности ($\theta = 0^\circ$);
- самый «медленный» сигнал с максимальными потерями интенсивности и максимальным числом отражений от оболочки ($\theta_{max} = 28^\circ$).

Интенсивность сигналов, вошедших в канал под углом $\theta > \theta_{max}$, равна 0 (такие сигналы будут поглощены оболочкой, ни разу от неё не отразятся и не дойдут до конца канала). Таким образом, учитывая естественное затухание сигналов, необходимо рассматривать их поведение в зависимости от угла θ на интервале $[0, \theta_{max}]$.

Естественное затухание сигнала определяется по формуле:

$$v'_j = v_j - z \cdot h_j,$$

где v_j – интенсивность сигнала на входе в канал, v'_j – интенсивность сигнала на выходе из канала, z – коэффициент затухания сигнала, определяющийся параметрами среды передачи данных, h_j – расстояние, м, пройденное сигналом от начала до конца канала, определяется по формуле: $h_j = t_H \cdot c$, где t_H зависит от θ по (1).

Коэффициент затухания рассеяния определяется по формуле $k_{расс} = R_p / \lambda^4$, где R_p – коэффициент рассеяния, λ – длина волны [9].

Коэффициент затухания поглощения определяется по формуле [10]:

$$k_{\text{полг}} = (\pi \cdot n_i / \lambda) \cdot \text{tg}(\delta) \cdot 8,69 \cdot 10^3,$$

где $\text{tg}(\delta)$ – тангенс угла диэлектрических потерь в световоде, n_i – показатель преломления для сердцевины.

Для расчёта затухания сигнала на изгибах важно понимать структуру и форму физических каналов. Пластинчатый делитель сигналов, представляющий из себя оптошину, состоящую из разнонаправленных физических каналов, необходимую для реализации полнодуплексного обмена данными, был предложен в [11]. Многоканальный делитель оптических сигналов (рис. 3) состоит из платы 1, на которой расположены корпуса микросхемы массивов оптических передатчиков 2 и оптических приёмников 3.

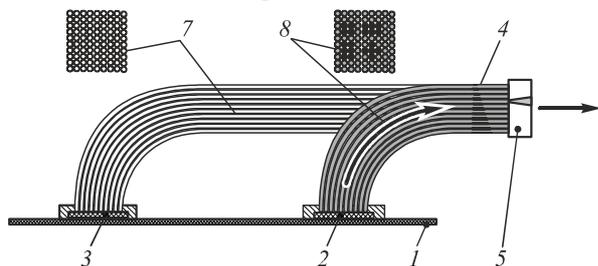


Рис. 3. Схема многоканального делителя сигналов: 1 – плата; 2 – массив оптических передатчиков (лазеров или светодиодов); 3 – массив оптических приёмников (фотодиодов); 4 – делитель; 5 – расширитель светового потока; 7 – пластина световодов оптических приёмников; 8 – пластина световодов оптических передатчиков

Делитель содержит расширитель светового потока 5 и соединённый с ним набор сложенных вплотную пластин световодов оптических приёмников 7 и пластин световодов оптических передатчиков 8. Набор пластин со световодами содержит два вида пластин 7 и 8 разной длины и формы, чередующихся друг с другом в пакете делителя 4. При этом чередующиеся пластины соединены одной стороной так, чтобы образовался общий торец, заканчивающийся у расширителя светового потока 5, расположенного перед оптошиной, а другие стороны образовали отдельные торцы, заканчивающиеся у массивов оптических передатчиков 2 и приёмников 3.

Пластины 7 и 8, содержащие световоды, образованы набором оптоволоконных световодов, соприкасающихся боковыми поверхностями, при этом в месте контакта друг с другом оптоволоконные световоды склеены, приварены или соединены друг с другом иным образом. Пластины 7 и 8 могут иметь плоскую или произвольную трёхмерную форму.

Расширитель светового потока 5 выполнен в виде пластины из прозрачного материала, он расположен у общего торца делителя 4, обращённого к месту соединения с оптошиной. Расширитель светового потока 5 может быть выполнен в виде объёма, заполненного прозрачным пластиком, гелем или воздухом. Выходя из световода в прозрачный материал, луч света, вследствие наличия апертурного угла, расши-

ряется, образуя освещённую область, размер которой может быть значительно больше диаметра ядра оптического волокна, образующего световод. Варьируя толщину расширителя светового потока 5, можно подобрать такую степень расширения лучей, которая обеспечивает устойчивое функционирование «смартлинк соединения» и надёжное восстановление его работоспособности при различных смещениях оптических шин относительно друг друга, а также относительно массивов приёмников и источников сигналов.

Принимая во внимание форму физических каналов, наличие изгибов переменной длины, необходимо учитывать затухание сигналов на изгибах, определяемое с помощью коэффициента [12]:

$$k_{\text{изгиб}} = \frac{h^2 \cdot d^2 \cdot n_1^2}{2D^6 \cdot (NA)^6},$$

где h – высота (радиус) изгиба, n_1 – показатель преломления для сердцевины, d – диаметр сердцевины, D – диаметр оболочки, NA – числовая апертура.

Таким образом, общие потери интенсивности сигнала в канале могут быть рассчитаны по формуле:

$$v_{\text{потери}} = (v_{\text{расс}} + v_{\text{полг}}) \cdot H + v_{\text{изгиб}} \cdot H_{\text{изгиб}}.$$

При выходе из передающих каналов K' сигналы активируют некоторое множество приёмников сигналов

$$P' = \{p_1', p_2', \dots, p_{n_3}'\},$$

где $0 \leq n_3 \leq n_3$ и $P' \subset P$.

В качестве параметров рассматриваемой системы передачи данных вводятся нижний v_{low} и верхний v_{top} пороги интенсивности, при которых происходит активация приёмников сигнала. Это означает, что некоторый приёмник $p \in P$ будет включён во множество P' , если принятый им сигнал, поступивший из канала $k_j \in K'$, имеет интенсивность $v_{\text{low}} \leq v_j' \leq v_{\text{top}}$. Нижний и верхний пороги интенсивности необходимы для фильтрации чрезмерно слабых и сильных сигналов. Такие сигналы могут быть сформированы в результате попадания в один канал $k_j \in K'$ нескольких сигналов, т.е. если имеет место взаимное пересечение нескольких множеств $K_j' \in K'$. Это необходимая, но недостаточная мера для фильтрации сформированных таким образом сигналов с непредсказуемой интенсивностью. Отметим, что нижний и верхний пороги являются параметрами системы передачи данных, а не физическими свойствами приёмников сигналов. Будем считать, что физически приёмники сигналов могут активироваться при приёме сигналов интенсивности $v > v_{\text{low}}$ и $v < v_{\text{top}}$.

Таким образом, активация некоторого множества источников сигнала $L' \subset L$ приводит к активации соответствующего множества приёмников сигнала $P' \subset P$. При этом для прохождения сигнала задействуется множество каналов $K' \subset K$. Очевидно, работа рассматриваемой системы невозможна без обратной связ-

зи, которая позволяет установить соответствие между множествами $L' \subset L$, $K' \subset K$ и $P' \subset P$.

Важно понимать, что каналы передачи данных из множества K – это физические каналы (оптические волокна в многоканальном оптоволоконном соединении), по которым передаются физические сигналы (лучи света). В существующих системах передачи данных по многоканальным оптоволоконным соединениям жёстко фиксируется взаимно-однозначное соответствие между передатчиками и приёмниками сигнала, т.е. каждому передатчику сигнала соответствует строго один уникальный физический канал передачи данных и строго один уникальный приёмник сигнала.

Такое взаимно-однозначное соответствие между передатчиком, каналом и приёмником будем называть логическим каналом передачи. В существующих системах передачи данных по многоканальным оптоволоконным

соединениям физические каналы передачи данных являются логическими каналами.

В рассматриваемой системе логические каналы в общем случае не совпадают с физическими. Определим логический канал передачи данных как множество следующего вида:

$$H = \{L', P', K'\},$$

где L' – множество активированных источников сигналов, P' – множество активированных приёмников сигналов, K' – множество физических каналов, задействованных для прохождения сигналов.

3. Разработка программного обеспечения для моделирования «смартлинк соединения»

Для моделирования работы «смартлинк соединения» было разработано приложение, главное окно которого представлено на рис. 4.

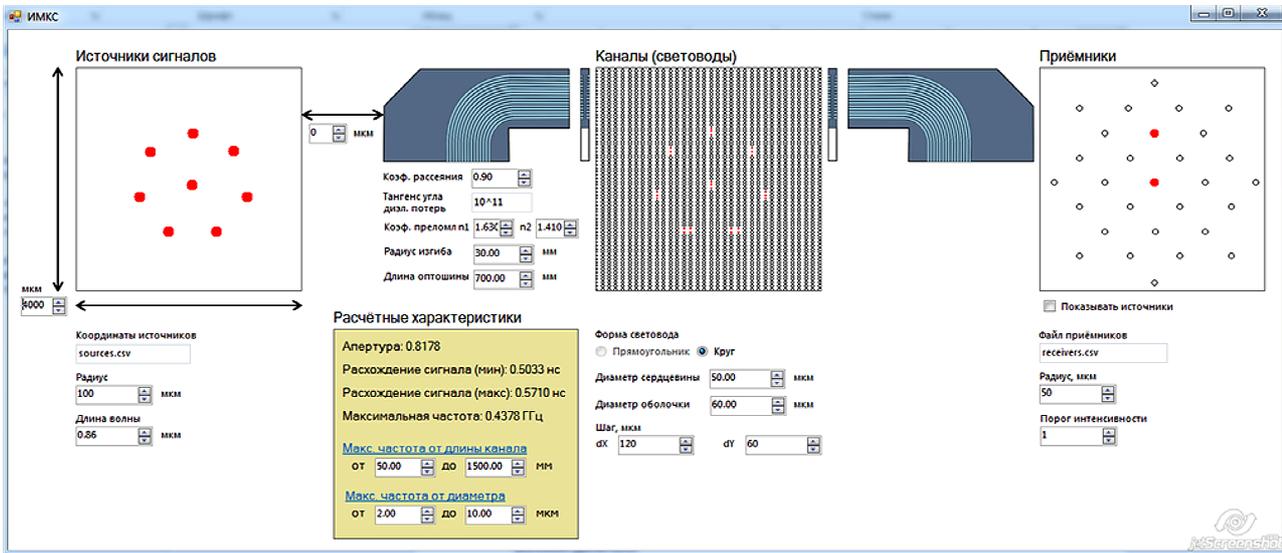


Рис. 4. Главное окно «Модели оптоволоконных делителей для ИМКС»

В главном окне можно выделить три блока:

- блок источников сигналов;
- блок приёмников сигналов;
- блок оптошины.

Каждый из блоков позволяет задать конфигурацию «смартлинк соединения». На основании заданной конфигурации производится вычисление расчётных характеристик соединения.

Пример конфигурации матрицы источников сигналов показан на рис. 5, координаты источников сигнала представлены в табл. 1.

Пример конфигурации матрицы приёмников сигналов показан на рис. 6, координаты источников сигнала представлены в табл. 2.

Пример конфигурации физических каналов в многоканальном оптическом делителе сигналов показан на рис. 7.

Основными функциями разработанного программного обеспечения являются функция коммутации каналов и функция самовосстановления соединения, основанные на описанной ранее математической модели «смартлинк соединения».

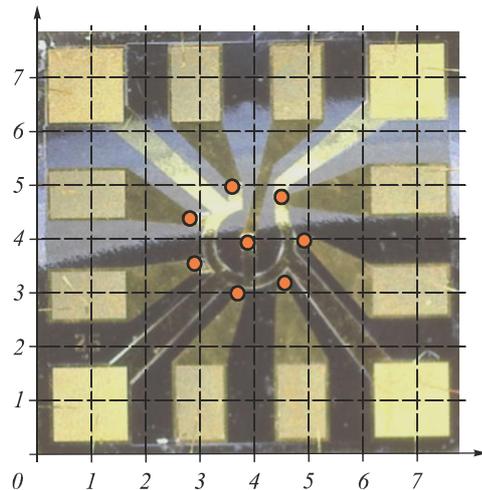


Рис. 5. Источники сигналов в координатах XOY

Функция коммутации каналов принимает в качестве входного параметра количество каналов n , необходимых для передачи данных, и возвращает множество каналов H_{use} , которые будут в дальнейшем использоваться для передачи данных.

Для формирования множества используемых каналов H_{use} необходимо предварительно сформировать сначала множество всех доступных для передачи данных каналов H_{av} , а затем множество каналов $H_{pos} \subset H_{av}$, по которым, в принципе, возможна передача данных.

Табл. 1. Координаты источников сигналов, мм

X	Y
3,42	4,72
4,26	4,72
2,90	4,08
4,81	4,08
3,83	3,88
3,10	3,29
4,57	3,28
3,85	2,96

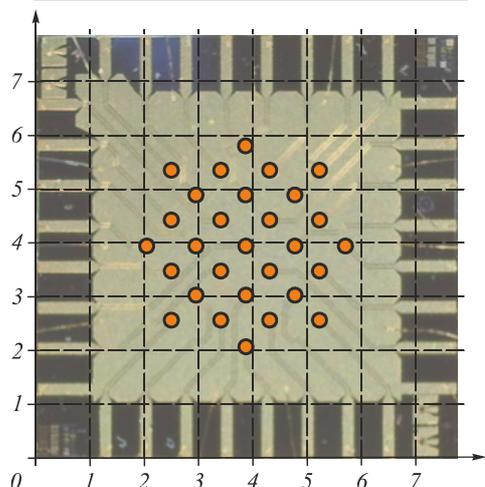


Рис. 6. Приёмники сигналов в координатах XОУ

Табл. 2. Координаты приёмников сигналов, мм

X	Y	X	Y
3,82	5,63	4,71	3,83
2,49	5,15	5,61	3,83
3,38	5,15	2,49	3,40
4,76	5,15	3,38	3,40
5,18	5,15	4,26	3,40
2,93	4,71	5,15	3,40
3,83	4,71	2,93	2,96
4,71	4,71	3,82	2,96
2,49	4,26	4,68	2,96
3,38	4,26	2,49	2,51
4,76	4,26	3,36	2,51
5,17	4,26	4,25	2,51
2,04	3,83	5,13	2,51
2,93	3,83	3,81	2,06
3,82	3,83		

Доступным каналом $H \in H_{av}$ будем называть любой логический канал, формирующийся при активации произвольного множества источников сигнала $L' \subset L$. Во множество возможных каналов H_{pos} должны быть включены только те доступные каналы, для которых множества активируемых приёмников сигнала различны.

В общем случае множество используемых каналов H_{use} может не совпадать со множеством возможных

каналов H_{pos} . Количество найденных возможных каналов может быть как больше, так и меньше заданного значения n . При выборе значения параметра n целесообразно руководствоваться аппаратными ограничениями соединения и оценкой потерь от распараллеливания.

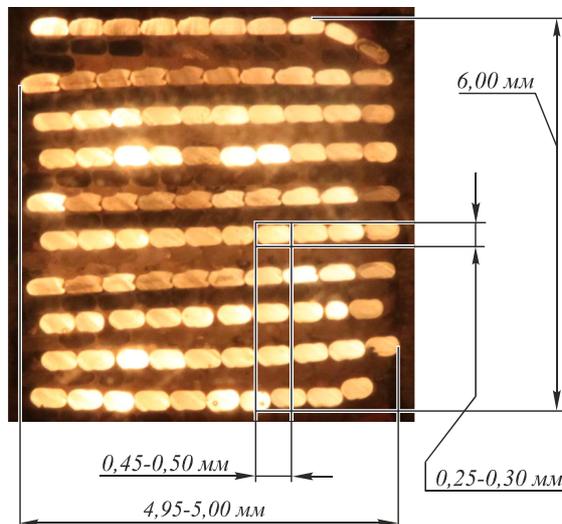


Рис. 7. Сечение оптического делителя, размеры световодов

Пусть N – множество всех возможных значений входного параметра n , а H_{all} – множество всех возможных подмножеств множества H_{av} мощности n . Общее количество таких комбинаций определяется как число сочетаний из n_{av} по n :

$$n_{all} = C_{n_{av}}^n = \frac{n_{av}!}{n!(n_{av} - n)!},$$

где n_{av} – общее количество доступных каналов, n – необходимое количество каналов.

Определим функцию коммутации каналов как отображение

$$Switching : N \rightarrow H_{all},$$

где $N = \{1, 2, \dots, n_{av}\}$, где n_{av} – это максимально возможное количество доступных каналов.

Значение n_{av} определяется как количество всех возможных комбинаций источников сигналов из множества L . Общее количество таких комбинаций определяется как сумма сочетаний из n_1 по m :

$$n_{av} = \sum_{m=1}^{n_1} C_{n_1}^m = \sum_{m=1}^{n_1} \frac{n_1!}{m!(n_1 - m)!},$$

где n_1 – общее количество источников сигналов, m – количество элементов в выборке из L (другими словами, это количество одновременно активированных источников сигналов).

Таким образом, формируется множество подмножеств, каждый элемент которого представляет собой возможный вариант сочетания элементов из множества L :

$$L_c = \{L_1, L_1, \dots, L_{n_{av}}\}.$$

Отметим, что элементы множества L_c могут быть различной мощности. Это означает, что одновремен-

но может быть активировано разное количество источников сигнала.

Для формирования множества всех доступных каналов H_{av} необходимо последовательно активировать каждое множество источников сигналов $\dot{L}_i \in \dot{L}_c$ и регистрировать соответствующие ему множество приёмников сигналов $P'_i \subset P$ и множество задействованных физических каналов $K'_i \subset K$ (здесь $1 \leq i \leq n_{av}$). В результате формируется множество доступных каналов:

$$H_{av} = \{H_{av,1}, H_{av,2}, \dots, H_{av,n_{pos}}\},$$

где каждый элемент $H_{av,i} \in H_{av}$ имеет вид

$$H_{av,i} = \{L_{av,i}, P_{av,i}, K_{av,i}\},$$

где $L_{av,i} \in \dot{L}_c, P_{av,i} \subset P, K_{av,i} \subset K$.

Одной из задач функции *Switching* является формирование множества возможных каналов H_{pos} как выборки элементов из множества доступных каналов H_{av} . Основное условие, которое должно соблюдаться при формировании множества H_{av} для любых двух каналов из множества H_{pos} , – множества активируемых ими приёмников сигналов не должны совпадать.

Основной задачей функции *Switching* является формирование множества используемых каналов H_{use} , по которым будет осуществляться непосредственная передача данных. При этом возможны следующие ситуации:

- если $n_{pos} < n$, то $H_{use} = H_{pos}$ и функция *Switching* генерирует предупреждение о том, что необходимое количество каналов не найдено;
- если $n_{pos} = n$, то $H_{use} = H_{pos}$;
- если $n_{pos} > n$, то в соответствии с некоторыми критериями множество каналов H_{use} формируется как выборка n элементов из множества H_{pos} .

Следует отметить, что передача данных должна начаться даже в том случае, когда необходимое количество каналов не найдено.

В процессе передачи данных соединение может быть нарушено. Одной из причин нарушения соединения может быть нарушение коммутации каналов вследствие, например, внешнего физического воздействия на систему передачи данных и повреждения либо смещения части физических каналов, передатчиков или приёмников сигнала. Для восстановления соединения в случае нарушения коммутации каналов необходимо повторно выполнить функцию коммутации каналов *Switching*. В общем случае задача обнаружения нарушения соединения – это задача всей системы передачи данных. Поиск ошибок должен быть реализован на нескольких уровнях протоколов. При этом нарушение соединения может быть как связано, так и не связано с нарушением коммутации каналов. Например, причиной нарушения может быть ошибка одного из протоколов верхнего уровня, в то время как коммутация каналов будет оставаться корректной. В любом случае при получении сообщения о нарушении необходимо выполнить проверку кор-

ректности коммутации каналов. Проверка коммутации каналов реализуется функцией *CheckSwitching*.

Определим функцию проверки коммутации каналов как отображение

$$CheckSwitching : H_{all}, N \rightarrow E.$$

Множество E определим как $E = \{0, 1\}$, где 0 означает корректность коммутаций каналов, а 1 – нарушение коммутации каналов.

Входными параметрами функции *CheckSwitching* являются используемое для передачи данных множество каналов $H_{use} \in H_{all}$ и требуемое количество каналов $n \in N$.

Для каждого логического канала $H_{use,i} \in H$, где $H_{use,i} = \{L_{use,i}, P_{use,i}, K_{use,i}\}; 1 \leq i \leq n_{use}$, необходимо активировать множество источников сигнала $L_{use,i} \subset L$ и зафиксировать задействованное для прохождения сигналов множество физических каналов $K'_{use,i} \subset K$, а также множество активированных при этом приёмников сигналов $P'_{use,i} \subset P$. Далее необходимо убедиться, что $P_{use,i} = P'_{use,i}$ и $K_{use,i} = K'_{use,i}$.

В том случае, если для какого-либо $H_{use,i} \in H$ данные условия не выполняются, функция *CheckSwitching* возвращает значение 1, после чего должна быть вызвана функция *Switching*.

4. Результаты моделирования

Результаты моделирования графически отображаются в создаваемом автоматически после завершения вычислений файле «*.png» (рис. 8).

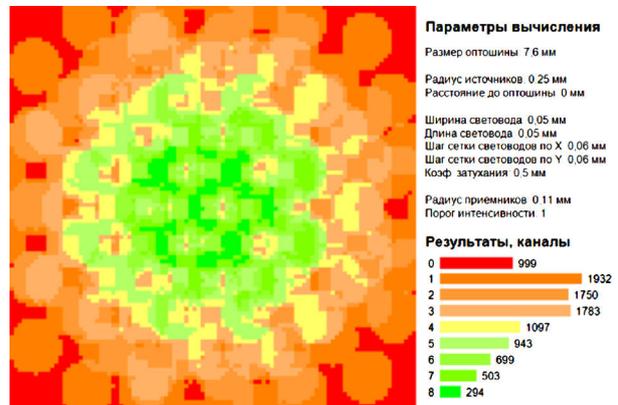


Рис. 8. Отображение результатов моделирования

Наиболее значим по результатам моделирования фактор, характеризующий шаг сетки размещения индивидуальных фотодиодов в массиве. При варьировании значениями этого фактора наибольшая активность в группе 6–8 каналов проявляется при выборе шага сетки массива фотодиодов, равной 0,5 мм.

Вторым по значимости фактором является радиус активной зоны единичного фотодиода. При варьировании значениями этого фактора наибольшая активность в группе 6–8 каналов, и определенно подавляюще для 8 каналов, проявляется при выборе радиуса активной зоны единичного фотодиода равным 105 мкм.

Менее значимым по сравнению с перечисленными факторами, но определённо весомым фактором является количество фотодиодов в массиве. Активность в группе 6–8 каналов при увеличении количества фотодиодов с 25 до 29 штук резко возрастает. При дальнейшем увеличении количества фотодиодов до 33 штук активность в группе 6–8 каналов незначительно повышается. Но этот рост активности можно, скорее всего, определить как «инерционный», так как использование в массиве указанного количества фотодиодов является практически нецелесообразным – имеет место выход границ массива фотодиодов за используемый оптический диаметр оптошины.

Заключение

Таким образом, математическая модель «смартлинк соединения» дополнена в части моделирования прохождения сигналов по физическим каналам, учтено размытие сигналов, а также несколько видов потерь интенсивности сигналов при их прохождении по световодам.

На основании построенной математической модели разработано программное обеспечение, реализующее и моделирующее функции коммутации каналов и самовосстановления соединения.

В ходе проведения экспериментов с использованием разработанного программного обеспечения были изучены свойства самовосстановления «смартлинк соединений», а также получены оптимальные характеристики для изготовления многоканальных оптических делителей сигналов.

Вместе с тем считаем преждевременным производить оценку скоростных характеристик «смартлинк соединения», поскольку данная модель в первую очередь предназначена для оценки возможностей самовосстановления системы передачи данных. Теоретический и практический пределы скорости связи ещё предстоит определить.

Благодарности

Работа выполнена в рамках ПНИ в соответствии с Соглашением с Министерством образования и науки РФ о предоставлении субсидии от 24.11.2014 г. №14.579.21.0067, уникальный идентификатор проекта: RFMEFI57914X0067.

Литература

- 10Gbits/sec and beyond: High speed in the data center [Electronical Resource]. – URL: www.cablinginstall.com/articles/print/volume-16/issue-1/features/10-gbits-sec-and-beyond-high-speed-in-the-data-center.html (Request date: 01.12.2013).

2. comScore Releases Overview of European Internet Usage in September 2011 [Electronical Resource]. – URL: http://www.comscore.com/Press_Events/Press_Releases/2011/11/comScore_Releases_Overview_of_European_Internet_Usage_in_September_2011 (Request date: 01.12.2013).
3. IBMCancelsBlueWaters [Electronical Resource]. – URL: <http://insidehpc.com/2011/08/08/ibm-cancels-blue-waters/> (Request date: 01.12.2013).
4. Пат. 2270493 Российская Федерация Н 01 L 23/525. Способы самовосстанавливающегося соединения многоконтактных приборов или микросхем и устройство для его осуществления / Никитин В.С., заявитель и правообладатель Никитин В.С.; № 2004101348/28, заявл. 16.01.2004, опубл. 20.02.2006, Бюл. № 5. – 20 с.: ил.
5. Шаров, В.Г. Оценка надежности системы передачи данных на основе интеллектуальных многоканальных оптоволоконных соединений / В.Г. Шаров, С.В. Чайка // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. – 2012. – № 2. – С. 169-175. – ISSN 2073-8072.
6. Шаров, В.Г. Адаптивный протокол передачи данных для многоканальных оптоволоконных соединений / В.Г. Шаров, В.С. Никитин, А.Н. Ломанов, С.В. Чайка // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. – 2011. – № 1. – С. 104-111. – ISSN 2073-8072.
7. Шаров, В.Г. Верификация адаптивного протокола передачи данных для многоканальных оптоволоконных соединений / В.Г. Шаров, А.Н. Ломанов, С.В. Чайка // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. – 2011. – № 3. – С. 113-119. – ISSN 2073-8072.
8. Ghatak, A. Optical waveguides and fibers. in: Fundamentals of photonics, module 1.7 [Electronical Resource] / A. Ghatak, K. Thyagarajan. – 2014. – URL: <http://spie.org/documents/publications/00stepmodule07.pdf> (Request date 15.03.2014).
9. Шумкова, Д.Б. Специальные волоконные световоды [Электронный ресурс] / Д.Б. Шумкова, А.Е. Левченко // – 2014. – URL: http://pstu.ru/files/file/FPM/01/shumkova_specialnye_volokonnye_svetovody.pdf (дата обращения 19.05.2014).
10. Ефанов, В.И. Расчёт потерь в делителях оптической мощности и затухания в оптическом волокне / В.И. Ефанов, Я.С. Гриншпон, Д.В. Вожаев, А.С. Уткина // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2014. – Т. 8, № 9. – С. 39-41.
11. Пат. 2419129 Российская Федерация G 06 F 3/042, Н 01 L 27/14. Многоканальный делитель сигналов для смартлинков / Никитин В.С.; заявитель и правообладатель ООО «НТЦ «Интрофизика»; № 2009131971, заявл. 24.08.2009, опубл. 20.05.2011, Бюл. № 14. – 7 с.: ил.
12. Чёткин, С.В. Методические указания по курсовому и дипломному проектированию оптических систем передачи / С.В. Чёткин // Метод. указания для студентов заочников 5 и 6 курсов. – М.: Московский технический университет связи и информатики, 2002. – С. 25-27.

Сведения об авторах Никитин Владимир Степанович, Семёнов Эрнст Иванович, Солостин Александр Викторович, Шаров Владимир Григорьевич и Чайка Сергей Владимирович см. стр. 61-62 этого номера.

Поступила в редакцию 21 сентября 2015 г.
Окончательный вариант – 28 февраля 2016 г.

MODELING THE 'SMARTLINK CONNECTION' PERFORMANCEV.S. Nikitin¹, E.I. Semyonov², A.V. Solostin¹, V.G. Sharov², S.V. Chayka¹¹ Scientific and Technological Center of Information Physics 'Introfizika' Ltd., Rubinsk, Russia,² P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, Rubinsk, Russia**Abstract**

The mathematical model 'Smartlink connection' has been extended to include the signal propagation through physical links, signal blurring, and several mechanisms of intensity loss as the signal travels through an optical fiber. Based on this mathematical model, we have developed the software to implement and simulate the circuit-switching and self-healing functions. In the experiments conducted with use of the developed software we studied the self-healing properties of the 'Smartlink connection' and evaluated optimal characteristics for the fabrication of a multi-channel signal divider.

Keywords: fiber optic connections, arrays, lasers, photodiodes.

Citation: Nikitin VS, Semyonov EI, Solostin AV, Sharov VG, Chayka SV. Modeling the 'smartlink connection' performance. *Computer Optics* 2016; 40(1): 64-72. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-64-72.

Acknowledgements: The work was partially funded under the Agreement with the RF Ministry of Education and Science No. 14.579.21.0067, grant RFMEFI57914X0067.

References

- [1] 10Gbits/sec and beyond: High speed in the data center. Source: www.cablinginstall.com/articles/print/volume-16/issue-1/features/10-gbits-sec-and-beyond-high-speed-in-the-data-center.html.
- [2] comScore Releases Overview of European Internet Usage in September 2011. Source: http://www.comscore.com/Press_Events/Press_Releases/2011/11/comScore_Releases_Overview_of_European_Internet_Usage_in_September_2011.
- [3] IBM Cancels Blue Waters. Source: <http://insidehpc.com/2011/08/08/ibm-cancels-blue-waters/>.
- [4] Nikitin VS. Methods of self-healing connections multicontact devices or circuits and device for its realization [In Russian], Pat RF of Invent N 2270493 of February 20, 2006, Russian Bull of Inventions N5, 2006.
- [5] Sharov VG, Chayka SV. Evaluation of reliability of the data transmission system based on intelligent multi-channel fiber-optic connections [In Russian]. A messenger RGATU of P.A. Solovyov 2012; 2: 169-175.
- [6] Sharov VG, Nikitin VS, Lomanov AN, Chayka SV. The adaptive transmission protocol for multi-fiber connections [In Russian]. A messenger RGATU of P.A. Solovyov 2011; 1: 104-111.
- [7] Sharov VG, Lomanov AN, Chayka SV. Verification of adaptive data transmission protocol for multi-fiber connections [In Russian]. A messenger RGATU of P.A. Solovyov 2011; 3: 113-119.
- [8] Ajoy Ghatak, K. Thyagarajan Optical waveguides and fibers / Fundamentals of photonics, module 1.7. Source: <http://spie.org/documents/publications/00%20step%20module%2007.pdf>.
- [9] Shumkova DB, Levchenko AE. Special optical [In Russian]. Source: http://pstu.ru/files/file/FPMM/of/shumkova_specialnye_volokonnye_svetovody.pdf.
- [10] Efanov VI, Grinshpon YS, Vozhdayev DV, Utkin AS. Calculating losses in splitters optical power and attenuation in the optical fiber [In Russian]. T-Comm – Telecommunications and Transport. 2014; 8(9): 39-41.
- [11] Nikitin VS. Multi-channel signal splitter for Smartlink [In Russian], Pat RF of Invent N 2419129 of August 24, 2009, Russian Bull of Inventions N14, 2011.
- [12] Chetkin SV. Guidelines for course and degree designing optical transmission systems. For students 5 and 6 courses [In Russian]. Moscow: Moscow Technical University of Communications and Informatics; 2002: 25-27.

The information about authors Vladimir Stepanovich Nikitin, Ernst Ivanovich Semenov, Alexander Viktorovich Solostin, Vladimir Grigoryevich Sharov, Sergey Vladimirovich Chayka you can find on page 63 of this issue.

Received September 21, 2015. The final version – February 28, 2016.
