

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артюшенко В.М., Малёнкин А.В. Количественная оценка электромагнитного влияния однопроводных линий электротехнического оборудования // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2008. – №1. – Т.4. – С. 29 – 32.

2. Говорков В.А., Куполян С.Д. Теория электромагнитного поля в упражнениях и задачах. – М.: Высшая школа, 1979. – 301 с.

3. Медведев А.А., Меньшиков В.А., Силантьев А.Ю. Стохастическое дифференциальное моделирование сложных технических систем. – Новосибирск: Наука, 1999. – 324 с.

4. Артюшенко В.М., Аббасова Т.С. Расчет и проектирование мультисервисных кабельных систем в условиях мешающих электромагнитных воздействий: учебное пособие. – Королев: ГБОУ ВПО ФТА, 2012. – 262 с.

Получено 23.10.14

Модель функционирования «смартлинк соединения»

В.С. Никитин, директор ООО «НТЦ «Интрофизика», к.т.н.; 505z@mail.ru
Э.И. Семенов, профессор ФГБОУ ВПО «РГТУ им. П.А. Соловьёва», д.т.н.; e.i.semenov@mail.ru
А.Н. Ломанов, декан факультета радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВПО «РГТУ им. П.А. Соловьёва», к.т.н.; lepss@yandex.ru
А.В. Солостин, заместитель директора ООО «НТЦ «Интрофизика»; 21solo@mail.ru
В.Г. Шаров, проректор ФГБОУ ВПО «РГТУ им. П.А. Соловьёва», к.ф.-м.н.; sharov@rsatu.ru
С.В. Чайка, программист ООО «НТЦ «Интрофизика»; chaika_sv@mail.ru

УДК 621.391.63

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 (ПО), реализующее и моделирующее функции коммутации каналов и самовосстановления соединения. В ходе проведения экспериментов с использованием разработанного ПО были изучены свойства самовосстановления «смартлинк соединений», а также получены оптимальные характеристики для изготовления оптических делителей сигналов.

Ключевые слова: оптоволоконные соединения, математическое моделирование, программное моделирование, источник сигналов, приемник сигналов, делитель сигналов.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы все большее внимание при проектировании высокопроизводительных вычислительных систем (сложных микросхем, многопроцессорных суперкомпьютерных систем) уделяется 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 (ПД). Если говорить о физической среде, то одним из перспективных направлений развития межсоединений являются многоканальные оптоволоконные соединения (ОС).

Основная причина, по которой ОС до сих пор не получили массового распространения, – сложность монтажа. Важно, чтобы при монтаже была выполнена строгая юстировка компонентов ОС (источника и приемника сигнала, а также оптического канала) друг относительно друга. Процедура юстировки и монтажа требует высокоточного, дорогостоящего оборудования.

Кроме того, ОС не обладает достаточной устойчивостью к внешним воздействиям: смещение компонентов друг относительно друга, а также чрезмерный излом оптоволоконного кабеля могут привести к трудно восстанавливаемому нарушению связи. Если говорить о многоканальных ОС, то увеличение количества каналов ведет не только к росту производительности соединения, но и к усложнению его монтажа.

Наиболее распространенные сегодня многоканальные ОС – это активные оптические кабели и высокоплотные параллельные ОС. 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 ОС является технология ПД по интеллектуальному многоканальному ОС (ИМКС) [4]. В статье приводятся результаты исследования системы ПД – «смартлинк соединения», построенной на основе предложенной технологии.

ОБЩАЯ СХЕМА «СМАРТЛИНК СОЕДИНЕНИЯ»

Общая схема «смартлинк соединения» показана на рис. 1. На входы лазерной матрицы 3 подаются электрические импульсы от управляющей микросхемы источника, которые модулируют излучение некоторого числа лазеров 1 (источников сигналов). Это излучение (сигналы 5 и 6) по оптошине (каналу ПД) поступает к матрице фотодиодов 10, содержащей некоторое число фотодиодов 7 и 9 (приемников сигналов). Активированные фотодиоды генерируют поток электрических импульсов к управляющей микросхеме приемника.

При соединении оптошину подключают к матрицам передатчика и приемника достаточно произвольно, совмещая лишь оптические области матриц и оптошины путем установки концов оптошины в оптические разъемы микросхем приемника и передатчика. Поэтому, зная только множество активированных фотодиодов матрицы-приемника, невозможно определить, каким из лазеров был испущен активировавший эти фотодиоды сигнал. Один из основных принципов рассматриваемой системы заключается в том, чтобы до начала ПД выполнить коммутацию логических каналов: установить соответствие между каждым лазером и фотодиодами, активируемыми этим лазером, а также задействованными для передачи сигналов каналами.

Процедура коммутации логических каналов производится однократно до начала ПД и никак не влияет на скорость передачи в дальнейшем. При обнаружении нарушения связи, например, из-за частичного повреждения оптошины или ее смещении относительно матриц прием-

ника и передатчика, процедура коммутации каналов может быть выполнена повторно без вмешательства оператора.

Теоретические исследования «смартлинк соединения» выполнены в [5–7]. В настоящей работе математическая модель была 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 ПО, реализующее и моделирующее функции коммутации каналов и самовосстановления соединения. В ходе проведения экспериментов с использованием разработанного ПО были изучены свойства самовосстановления «смартлинк соединений» и получены оптимальные характеристики для изготовления оптических делителей сигналов.

В [8] приводится методика, позволяющая оценить надежность технологии ИМКС, по которой построено «смартлинк соединение», относительно наиболее развитой технологии ПД, реализованной в активных оптических кабелях (АОК). Для каждой технологии построены структурно-логические схемы уровня логического канала и уровня соединения, а также получены формулы расчета надежности:

$$P_{АОК} = P_{Н,1} P_{Н,2} \dots P_{Н,n} = P_{Н}^n,$$

где $p_{Н}$ – надежность логического канала АОК, расчет которой представлен в [8];

Рисунок 1

Схема прохождения сигналов: 1 – активированный источник света; 2 – неактивированный источник света; 3 – матрица излучателей; 4 – незадействованные волокна оптошины; 5 – задействованные 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 фотоприемников

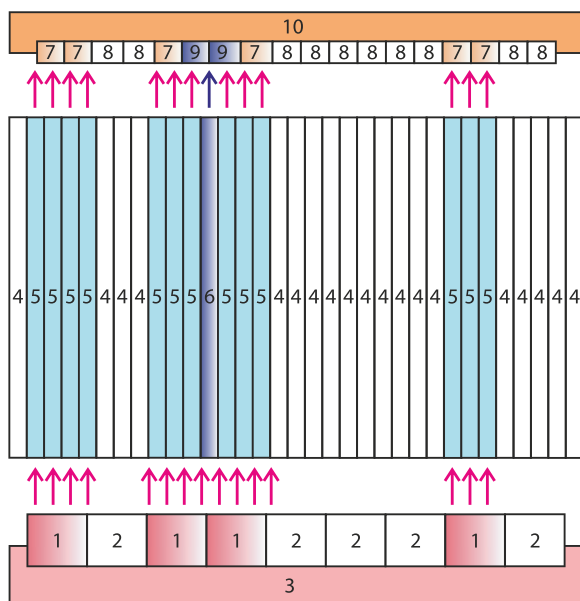


Рисунок 2

Зависимость надежности от отношения количества физических каналов к количеству источников сигнала

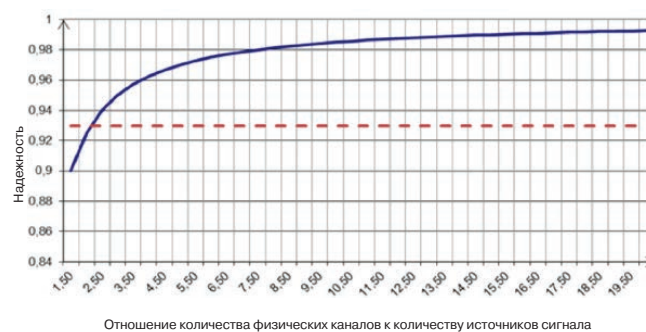


Рисунок 3

Зависимость надёжности от отношения количества приёмников к количеству физических каналов

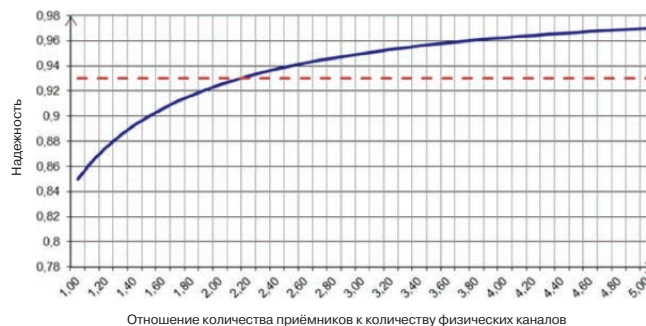


Рисунок 4

Зависимость надежности от отношения расстояния между источником сигнала и физическим каналом к диаметру канала

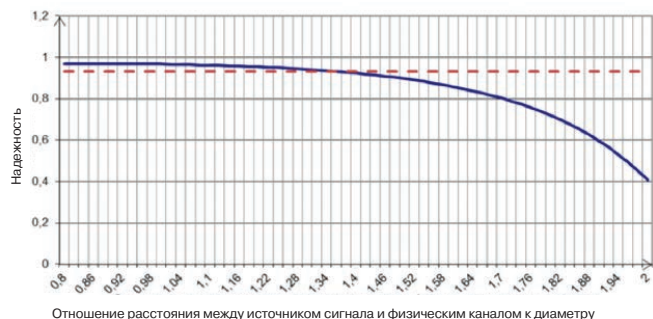


Рисунок 5

Схема экспериментальной установки: 1 – тестовое приложение верхнего уровня; 2 – user-mode драйвер устройства; 3 – kernel-mode драйвер устройства; 4 – шина PCIe; 5, 6 (как единое целое) – устройство на шине PCIe (ПЛИС-1, ПЛИС-2); 5 – часть ПЛИС, отвечающая за взаимодействие с ПК; 6 – часть ПЛИС, отвечающая за коммутацию и управление каналами «смартлинк соединения»; 7 – драйвер матрицы лазеров; 8 – матрица лазеров; 9 – матрица фотодиодов; 10 – драйвер матрицы фотодиодов; 11 – электрические соединения; 12 – оптошина

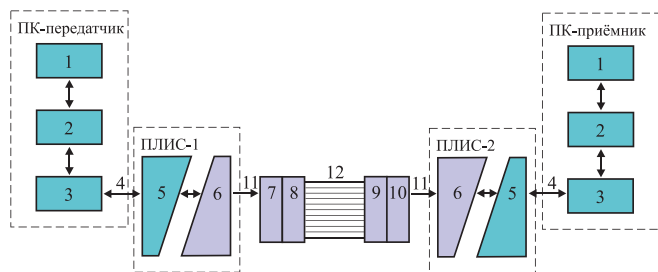


Рисунок 6

Схема многоканального делителя сигналов: 1 – плата; 2 – массив оптических передатчиков (лазеров или светодиодов); 3 – массив оптических приемников (фотодиодов); 4 – делитель; 5 – расширитель светового потока; 6 и 7 – пластины световодов оптических приемников и передатчиков, соответственно

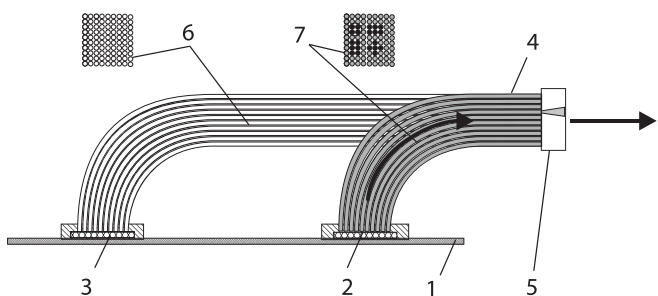
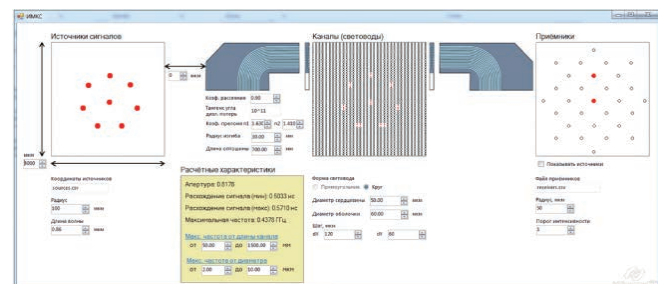


Рисунок 7

Главное окно приложения



➤

$$P_{IMKS} = \sum_{k=0}^{n+m} C_{n+m}^k P_{IMKS_H}^k (1 - P_{IMKS_H})^{n+m-k},$$

где P_{IMKS_H} – надежность логического канала ИМКС [8].

В [8] также представлены результаты некоторых исследований (рис. 2–4), выполненных по описанной методике и показывающих возможность достижения лучших характеристик надежности для ИМКС, по сравнению с АОК при выборе оптимальных параметров соединения.

ОБЩАЯ СХЕМА И ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для проведения экспериментальных исследований системы ПД была спроектирована и разработана экспериментальная установка [7]. На рис. 5 светло-серым цветом условно выделено «смартлинк соединение».

Для обеспечения полнодуплексного соединения был разработан многоканальный делитель сигналов [9], представляющий оптошину, состоящую из разнонаправленных физических каналов и необходимую для реализации полнодуплексного обмена данными. Делитель (рис. 6) состоит из платы 1, на которой расположены корпуса микросхем массивов оптических передатчиков 2 и приемников 3.

Делитель содержит расширитель светового потока 5 и соединенный с ним набор сложных вплотную пластин световодов оптических приемников 6 и пластин световодов оптических передатчиков 7. Набор пластин со световодами содержит два вида пластин 6 и 7 разной длины и формы, чередующихся друг с другом в пакете делителя 4. При этом чередующиеся пластины соединены одной стороной так, чтобы образовался общий торец, обращенный к месту соединения с оптошиной (на рис. 6 не показана). Другие стороны образовали раздельные торцы, заканчивающиеся у массивов оптических передатчиков 2 и приемников 3.

Пластины 6 и 7, содержащие световоды, образованы набором ОС, соприкасающихся боковыми поверхностями. При этом в месте контакта друг с другом ОС склеены, приварены или соединены друг с другом иным образом. Пластины 6 и 7 могут иметь плоскую или произвольную трехмерную форму.

Расширитель светового потока 5, собранный в виде пластины из прозрачного материала, расположен у общего торца делителя 4, обращенного к месту соединения с оптошиной. Расширитель светового потока 5 может быть выполнен в виде объема, заполненного прозрачным пластиком, гелем или воздухом. Выходя из световода в прозрачный материал, луч света из-за наличия апертурного угла расширяется, образуя освещенную 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 надежное восстанов-



ление его работоспособности при различных смещениях оптических шин относительно не только друг друга, но и массивов приемников и источников сигналов.

РАЗРАБОТКА ПОДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ «СМАРТЛИНК СОЕДИНЕНИЯ»

Для моделирования работы компонентов программной реализации было разработано приложение, главное окно которого представлено на рис. 7.

В главном окне можно выделить три блока: источников сигналов, приемников сигналов и оптошины. Каждый из блоков позволяет задать конфигурацию «смартлинк соединения», на основании которой вычисляются расчетные характеристики соединения.

Основными функциями разработанного ПО являются функции коммутации каналов и самовосстановления соединения. Работа этих функций была смоделирована в [6] с использованием аппарата раскрашенных сетей Петри (РСП). Применение РСП позволяет рассматривать в динамике перемещение данных, в том числе и параллельное перемещение. Разметка РСП дает возможность увидеть, в каком состоянии находится каждый из компонентов системы ПД. В качестве программного инструмента, позволяющего выполнять моделирование и верификацию протоколов с помощью аппарата РСП, был выбран пакет CPN/Tools, разработанный CPNGroup. В среде CPN/Tools используется временной механизм, а также встроенный язык программирования CPNML (на основе StandardML).

В динамической модели реализованы множества L , K , P и H , описанные в математической модели. Каждое множество представлено в виде объекта типа *list* (списка). Каждый элемент списка (источник сигнала, приемник сигнала, физический или логический канал) представлен в виде объекта с заданным набором атрибутов.

Основные атрибуты источников и приемников сигналов, физических и логических каналов определяются в системе координат XYZ. Если предположить, что каждый источник сигнала, приемник сигнала и канал в поперечном сечении имеют форму окружности, то система в проекции на плоскость XOY будет выглядеть как множество пересекающихся окружностей с координатами центра $\{x, y\}$ и радиусом r .

Для описания источника сигнала в динамической модели определен тип:

$colsetSRCSet = record id: INT * x: INT * y: INT * r: INT * v: INT.$

Каждый объект типа *SRCSet* имеет следующие атрибуты: *id* – уникальный идентификатор; *x* – координата по оси X; *y* – координата по оси Y; *r* – радиус окружности поперечного сечения; *v* – интенсивность сигнала, испускаемого источником.

Для описания множества источников сигналов определяется тип:

$colsetSRCList = listSRCSet.$

Аналогично определяются типы *CHANList* и *RECList* для описания множеств каналов ПД и приемников сигнала.

Для описания логического канала в динамической модели определен тип:

$colsetLOGCHANSet = record id: INT * src: SRCList * chan: CHANList * rec: RECList * status: INT.$

Каждый объект типа *LOGCHANSet* имеет следующие атрибуты: *id* – уникальный идентификатор; *src* – множество источников сигнала; *chan* – множество физических каналов; *rec* – множество приемников сигнала; *status* – статус логического канала. Для описания множества логических каналов в динамической модели определяется тип

$colsetLOGCHANList = listLOGCHANSet.$

На возможность распознавания сигналов влияют несколько факторов:

- размытие сигнала;
- естественное затухание сигнала;
- затухание рассеяния и 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. 8 изображен процесс прохождения сигнала по оптическому каналу. Очевидно сигнал, направленный под нулевым углом ($\theta = 0^\circ$) к оси канала, дойдет 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 $k_{разм}$ на выходе из канала определяется по формуле:

$$k_{разм} = \frac{t_H}{T_s},$$

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

Время прохождения сигнала t_H по каналу:

$$t_H = \frac{H}{c} + \Delta\tau.$$

Здесь $\Delta\tau$ зависит от угла θ следующим образом [10]:

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

где $V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta}$; $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$;

a – радиус сердцевины оптического канала; λ – длина волны; H – длина канала. ➤

Рисунок 8
Прохождение сигналов в оптическом канале

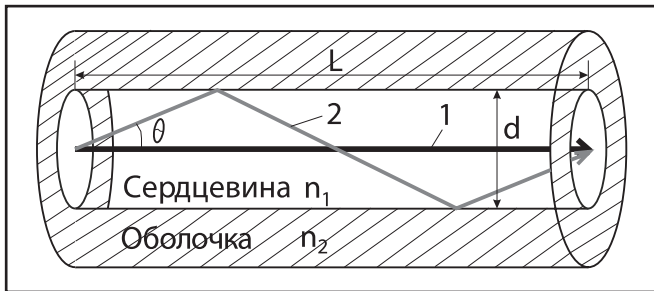


Рисунок 9
Отображение результатов моделирования



Очевидно, что существует такой предельный коэффициент размытия $k_{разм, макс}$, при котором дальнейшее его повышение приведет к появлению на выходе из канала чрезмерно размытых сигналов. От угла θ также зависит естественное затухание сигнала при его прохождении по физическому каналу, поскольку увеличение угла θ ведет к возрастанию расстояния, которое должен пройти сигнал. Также необходимо учитывать потери интенсивности сигнала при его отражении от оболочки (чем больше отражений, тем больше потери).

Существует некоторый предельный угол θ_{max} , превышение которого означает, что сигнал, вошедший в канал под таким углом, будет полностью поглощен оболочкой. Размер 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 сердцевинки канала; n_2 — коэффициент преломления оболочки канала. Например, если $n_1 = 1,63$, $n_2 = 1,41$, 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 нее не отразятся и не дойдут до конца канала). Таким образом, учитывая естественное затухания сигналов, необходимо рассматривать их поведение в зависимости от угла θ на интервале $[\theta, \theta_{max}]$.

Естественное затухание сигнала определяется по формуле:

$$v'_j = v_j - zh_j,$$

где v_j — интенсивность сигнала на входе в канал; v'_j — интенсивность сигнала на выходе из канала; z — коэффициент затухания сигнала, определяемый параметрами среды ПД; $h_j = t_H c$ — расстояние, м, пройденное сигналом от начала до конца канала. Значение t_H зависит от θ по (1).

Кoeffициент затухания рассеяния $k_{расс}$ [11]:

$$k_{расс} = \frac{R_p}{\lambda^4},$$

где R_p — коэффициент рассеяния; λ — длина волны.

Кoeffициент затухания поглощения $k_{погл}$ [12]:

$$k_{погл} = \frac{\pi n_1}{\lambda} \text{tg}(\delta) \times 8,69 \times 10^3,$$

где $\text{tg}(\delta)$ — тангенс угла диэлектрических потерь в световоде; n_1 — показатель преломления для сердцевинки.

Принимая во внимание форму физических каналов и наличие изгибов переменной длины, необходимо учитывать затухание сигналов на изгибах, определяемое с помощью коэффициента $k_{изгиб}$ [13]:

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

где h — высота (радиус) изгиба; n_1 — показатель преломления для сердцевинки; d — диаметр сердцевинки; D — диаметр оболочки; NA — числовая апертура.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования графически отображаются в создаваемом автоматически после завершения вычислений файле «*.png» (рис. 9).

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

Второй по значимости фактор — радиус активной зоны единичного фотодиода. При варьировании значениями этого фактора наибольшая активность соединения при рассмотрении группы из 6–8 каналов ПД (особенно 8 каналов ПД) проявляется при выборе радиуса активной зоны единичного фотодиода, равного 105 мкм.

Менее значимым фактором по сравнению с перечисленными, но бесспорно весомым является число фотодиодов в массиве. Активность в группе из 6–8 каналов при увеличении количества фотодиодов с 25 до 29 шт. резко возрастает. При дальнейшем увеличении



числа фотодиодов до 33 шт. активность в группе из 6–8 каналов незначительно повышается. Но этот рост активности можно скорее всего определить как «инерционный», так как применение в массиве указанного числа фотодиодов нецелесообразно – имеет место выход границ массива фотодиодов за используемый оптический диаметр оптошины.

ВЫВОДЫ

1. 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.

2. На основании построенной математической модели разработано ПО, реализующее и моделирующее функции коммутации каналов и самовосстановления соединения.
3. В ходе проведения экспериментов с помощью разработанного ПО изучены свойства самовосстановления «смартлинк соединений», а также получены оптимальные характеристики для изготовления оптических делителей сигналов.

Исследования проводились в рамках выполнения проекта в соответствии с Соглашением о предоставлении субсидии от 24.11.2014 г. №14.579.21.0067. Уникальный идентификатор проекта: RFMEFI57914X0067.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. comScore Releases Overview of European Internet Usage in September 2011 [Электронный ресурс]. – URL: http://www.comscore.com/Press_Events/Press_Releases/2011/11/comScore_Releases_Overview_of_European_Internet_Usage_in_September_2011 (дата обращения: 01.12.2013).

3. IBM Cancels Blue Waters [Электронный ресурс]. – URL: <http://insidehpc.com/2011/08/08/ibm-cancels-blue-waters/> (дата обращения: 01.12.2013).

4. Никитин В.С. Способы самовосстанавливающегося соединения многоконтактных приборов или микросхем и устройство для его осуществления. – ООО «НТЦ «Интрофизика» / Патент РФ на изобретение № 2270493 от 16.01.2004.

5. Шаров В.Г., Никитин В.С., Ломанов А.Н., Чайка С.В. Адап-

тивный протокол передачи данных для многоканальных оптоволоконных соединений // Вестник РГТУ им. П.А. Соловьёва. – 2011. – № 1. – С. 104–111.

6. Шаров В.Г., Ломанов А.Н., Чайка С.В. Верификация адаптивного протокола передачи данных для многоканальных оптоволоконных соединений // Вестник РГТУ им. П.А. Соловьёва. – 2011. – № 3(21). – С. 113–119.

7. Шаров В.Г. Программно-аппаратный комплекс передачи данных по многоканальному оптоволоконному соединению / ФГБОУ ВПО «РГТУ им. П.А. Соловьёва» // Патент РФ на полезную модель № 125740 от 10.03.2013.

8. Шаров В.Г., Чайка С.В. Оценка надежности системы передачи данных на основе интеллектуальных многоканальных оптоволоконных соединений // Вестник РГТУ им. П.А. Соловьёва. – 2012. – № 2(23). – С. 169–174.

9. Никитин В.С. Многоканальный делитель сигналов для смартлинков. – ООО «НТЦ «Интрофизика» / Патент РФ на изобретение № 2419129 от 24.08.2009.

10. Ajoy Ghatak, Thyagarajan K. Optical waveguides and fibers / Fundamentals of photonics, module 1.7 [Электронный ресурс]. – 2014. – URL: <http://spie.org/documents/publications/00stepmodule07.pdf> (дата обращения 15.03.2014).

11. Шумкова Д.Б., Левченко А.Е. Специальные волоконные световоды [Электронный ресурс]. – 2014. – URL: http://pstu.ru/files/file/FPMM/of/shumkova_specialnye_volokonnye_svetovody.pdf (дата обращения 19.05.2014).

12. Ефанов В.И., Гриншпон Я.С., Вождаев Д.В., Уткина А.С. Расчет потерь в делителях оптической мощности и затухания в оптическом воллоке // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2014. – Т. 8, № 9. – С. 39–41.

13. Четкин С.В. Методические указания по курсовому и дипломному проектированию оптических систем передачи / Для студентов заочников 5 и 6 курсов. – М.: МТУСИ, 2002. – С.25–27.

Получено 26.10.2015