

Т.М. МАНСУРОВ, Ч.П. АЛИЕВ, Г.И. ГУЛИЕВА, Э.Т. МАНСУРОВ
Азербайджанский технический университет, г. Баку

ФОТОННЫЙ КОММУТАТОР КВАНТОВОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ И ОПТИЧЕСКОГО ШУМА ПО КВАНТОВОМУ КАНАЛУ СВЯЗИ

В работе решены вопросы разработки фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи, схема его управления и математическая модель функционирования, позволяющие повысить точность процесса пространственной коммутации выхода квантовой системы с входом оптического волокна, уменьшить потери, связанные с радиальным смещением и угловым рассогласованием источника сигналов оптического излучения, а также расширить функциональные возможности. Данные разработки позволили упростить конструкцию, повысить точности процесса пространственной коммутации сигналов оптического излучения, эксплуатационную надежность, а также расширить функциональные возможности. Работа представляет интерес для широкого круга специалистов, занимающихся принципами построения оптической связи, процессами, происходящими при передаче сигналов оптического излучения по оптическому волокну, изучениями основных закономерностей коммутации и ввода энергетического потенциала сигналов оптического излучения квантовой системы в оптическое волокно.

Ключевые слова: коммутация каналов, фотонный коммутатор, оптическое излучение, квантовая система, радиальное смещение, угловое рассогласование, надежность.

T.M. MANSUROV, CH.P. ALIYEV, G.I. GULIYEVA, E.T. MANSUROV
Azerbaijan Technical University, Baku

THE PHOTON SWITCHBOARD OF QUANTUM SYSTEM OF INFORMATION TRANSFER AND OPTICAL NOISE ON THE QUANTUM COMMUNICATION CHANNEL

In work issues of development of the photon switchboard of quantum system of information transfer and optical noise on a quantum communication channel, the scheme of his management and mathematical model of functioning allowing to increase the accuracy of process of spatial switching of an exit of quantum system with an input of optical fiber, to reduce the losses connected with the radial shift and an angular mismatch of a source of signals of optical radiation and also to expand functionality are resolved. These developments have allowed to simplify a design, to raise the accuracy of process of spatial switching of signals of optical radiation, operational reliability and also to expand functionality. Reduction of total of mechanical elements and knots with an irregular geometrical shape and a configuration simplifies a design of the offered switching device. Increase in accuracy of process of switching of a signal of quantum system is provided by introduction of two piezoelectric bimorph elements having rather smaller mobile weight and, therefore, smaller lag effect and also due to lack of mechanical side plays of knots. Operational reliability increases because optical fibers of communication channels aren't exposed to deformation, i.e. are in a motionless state since scanning of a signal of quantum system is carried out by his reflection by an adaptive pocket mirror through a mirror - the reflector to openings of a level of the switching optical fibers. Work is of interest for a wide range of the experts who are engaged in the principles of creation of optical communication, processes happening when signalling optical radiation on optical fiber, studying of the main regularities of switching and input of energy potential of signals of optical radiation of quantum systems in optical fiber at creation of optical communication networks.

Keywords: channel switching, photon switchboard, optical radiation, quantum system, radial shift, angular mismatch, reliability.

Введение

В настоящее время на инфокоммуникационных сетях для приема информации, передаваемой квантовой системой по оптическим волокнам оптического кабеля, применяются фотоприемники, работающие в режиме счета фотонов [1]. Также при защите информации, транслируемой по оптическим каналам связи методами квантовой криптографии, в качестве приемника информации часто используют счетчики фотонов [2–11]. Одной из наиболее важных проблем, стоящих перед разработчиками систем передачи информации по оптоволоконным и открытым каналам оптической связи, является повышение чувствительности приемного модуля. Решение этой задачи позволит уменьшить необходимое для качественной передачи информации число промежуточных регенерационных пунктов. Для приема сигналов квантовой системы малой мощности необходимо использовать высокочувствительные методы регистрации оптического излучения, одним из которых является счет фотонов [1]. Наряду с этим, решающую роль играет разработка устройства согласования выхода источника и входа приемника с волокнами оптического кабеля для передачи полного энергетического потенциала выходного сигнала квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи. В качестве устройств согласования применяются фотонные коммутаторы, устройства позиционирования и переключения, дефлекторы, модуляторы с электрическим и оптическим управлением, устройства ввода и вывода оптического сигнала, соединители, ослабители, изоляторы, поляризационные контроллеры, разветвители, мультиплексоры, демультимплексоры и фильтры. Эти устройства характеризуются параметрами согласования, т.е. коэффициентом ввода энергетического потенциала сигнала в волокно оптического кабеля, вносимым затуханием, рабочим диапазоном длин волн или частот, допустимым уровнем мощности. В связи с этим решение задачи по обеспечению точного согласования является одной из наиболее распространенных и важных задач исследования. Несогласованное включение приводит к дополнительным потерям и искажениям сигнала квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу

связи

Анализ существующих устройств согласования показывает, что они имеют сложную механическую конструкцию, относительно низкую надежность и не обеспечивают достаточно высокую точность процесса коммутации каналов передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи. Кроме того, процесс коммутации каналов требует автоматического управления направлением распространения сигналов квантовой системы относительно поверхности торцевого сечения оптического волокна в вертикальном и горизонтальном направлениях при возникновении различных аварийных и других необходимых случаях. В связи с этим, практический и теоретический интерес представляет собой задачи разработки и моделирования фотонного коммутатора квантовой системы, как пассивный компонент линейного тракта оптической связи.

Объектом исследований является фотонный коммутатор квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи.

Предметом исследований является исследование основных закономерностей процесса коммутации, выполняемого фотонного коммутатора квантовой системы, применяемых при передаче информации и оптического шума по квантовому каналу связи.

Целью работы является разработка фотонного коммутатора квантовой системы, схемы управления и математической модели функционирования, позволяющие повысить точность процесса фотонной коммутации, уменьшить потери, связанные с радиальным смещением и угловым рассогласованием источника сигнала, а также расширить функциональные возможности.

Состояние проблемы и постановка задачи

Известны устройства согласования передачи оптических сигналов [11–18], в которых в основном используются резьбовые соединения, в процессе эксплуатации которых происходит механический износ резьбовых поверхностей, приводящий к неизбежному появлению люфтов, которые способствуют смещению центров лучепередающих и лучепринимающих оптических волокон двух отрезков оптического кабеля. Из-за сравнительно меньшего поперечного сечения оптического волокна смещение центров создает потери энергетического потенциала полезного сигнала квантовой системы в процессе передачи и эти устройства не обеспечивают высокую точность коммутации каналов передачи сигналов квантовой системы. Поэтому актуальным является задача исследование основных закономерностей процесса пространственной коммутации каналов передачи информации по оптическому волокну. Процесс пространственной коммутации каналов осложняется еще и тем, что не имеются конкретные данные о координатах расположения в пространстве выхода и входа приемопередающего устройства и оптического волокна, т.е. существует угловое расхождение положения между ними. В процессе передачи информации задача поиска, наведения и слежения за оптическим излучением требует достаточно быстрого изменения направления распространения оптического излучения по некоторому периодическому (поиск) или аperiodическому (слежение) закону. Эта задача выполняется в основном коммутаторами, дефлекторами, разветвителями и модуляторами с электрическим и оптическим управлением и др. Время, точность и эффективность процесса коммутации квантовых каналов зависит от сложности конструкции самого фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи, обеспечивающего автоматическое совмещение осей приемопередатчика.

В связи с этим возникает необходимость решения задач разработки и моделирования пассивных компонентов оборудования линейного тракта оптической связи, т.е. фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи, схемы управления и аналитического метода расчета параметров, позволяющие повысить точность процесса фотонной коммутации, уменьшить потери, связанные с радиальным смещением и угловым рассогласованием оптического волокна, упростить конструкцию, повысить эксплуатационную надежность, а также расширить функциональные возможности.

Формирование функции цели. Эффективность процесса передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи определяется многими факторами, к числу которых можно отнести повышение эффективности использования существующих линейных сооружений, уменьшение дисперсионных искажений, увеличение длины регенерационных участков, уменьшение числа промежуточных регенерационных пунктов, исследование основных закономерностей процесса фотонной коммутации, переключения и позиционирования направления оптического излучения квантовой системы передачи информации при вводе в оптическое волокно.

Повышение энергетической эффективности передачи сигналов квантовой системы заключается в решении двух основных задач, т.е. формировании целевой функции и определении таких значений ее показателей, которые обеспечили бы работу фотонного коммутатора в оптимальных значениях целевой функции. Руководствуясь вышеперечисленными принципами целевую функцию процесса коммутации фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу можно представить в следующем виде:

$$E_{эфд} = \{ \min [t_{ком}, \Delta_{ком}, n_{НПП}], \max [K_{эф}, L_{рв}] \}, \quad (1)$$

где $t_{ком}$ – время (быстродействие) фотонного коммутатора каналов передачи сигнала квантовой системы; $\Delta_{ком}$ – погрешность процесса коммутации, выполняемого фотонным коммутатором квантовой

системы; $n_{\text{НРП}}$ – число промежуточных необслуживаемых регенерационных пунктов, размещаемых вдоль оптической кабельной магистрали; $K_{\text{ос}}$ – коэффициент ввода фотонным коммутатором энергетического потенциала сигналов квантовой системы передачи информации и оптического шума в оптическое волокно; $L_{\text{пу}}$ – длина регенерационного участка.

Для повышения эффективности передачи сигналов квантовой системы проведено исследование по разработке фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи и моделированию процесса его функционирования, обеспечивающего оптимального значения аргументов вышеприведенной целевой функции.

Схема организации оптической связи. Схема организации оптической связи с фотонным коммутатором квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи приведена на рис. 1.

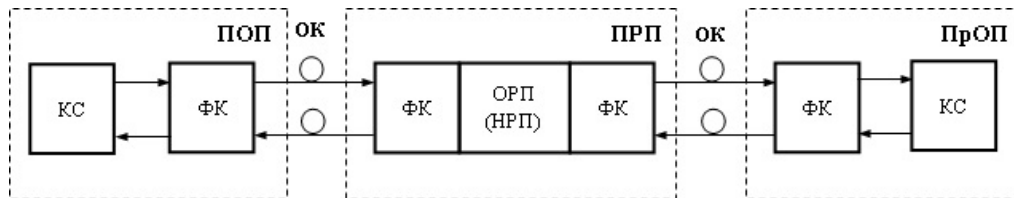


Рис. 1. Схема организации оптической связи передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи

Схема организации оптической связи состоит из передающего (ПОП) и приемного (ПрОП) оконечного пункта, промежуточного регенерационного пункта (ПРП) и оптического кабеля (ОК). В свою очередь, каждый оконечный пункт состоит из квантовой системы (КС), фотонного коммутатора (ФК), а ПРП из двух ФК, обслуживаемого (ОРП) или необслуживаемого регенерационного пункта (НРП).

Структурная схема квантовой системы передачи и приема информации и оптического шума по квантовому каналу связи представлена на рис. 2 [1].

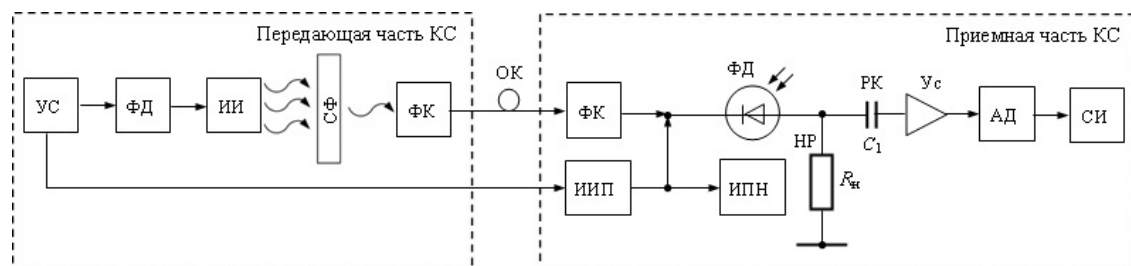


Рис. 2. Структурная схема квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи

Передающая часть квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи содержит устройство синхронизации (УС), формирователь данных (ФД), источник излучения (ИИ), световой фильтр (СФ) и фотонный коммутатор (ФК), а приемная часть – источник импульсного питания (ИИП), источник постоянного напряжения (ИПН), фотонный коммутатор (ФК), лавинный фотодиод (ФД), усилитель (Ус), амплитудный детектор (АД), счетчик импульсов (СИ), разделительный конденсатор (РК) C_1 и нагрузочный резистор (НР) R_n .

Принцип работы квантовой системы передачи. Синхронизация моментов времени передачи и приема информации и обеспечение согласованной работы ИИ и ФД осуществляется УС, которое подает сигнал на вход ФД и ИИП. В случае отсутствия на выходе УС импульса, данные в канал связи не поступают, ИИП не генерирует импульсы и напряжение на его выходе равно нулю. При этом ИПН обеспечивает приблизительно 99% уровня напряжения обратного смещения ФД по сравнению с напряжением его пробоя. Отметим, что значение напряжения питания ФД, меньшее напряжения пробоя не позволяет ФД работать в режиме счета фотонов. При поступлении сигнала синхронизации на вход ФД, последний на своем выходе генерирует электрический импульс в случае необходимости передать символ «1». При передаче символа «0» выходной импульс не формируется. Импульс с выхода ФД подается на вход ИИ, на выходе которого возникает оптический импульс, ослабляемый СФ в среднем до одного фотона, в результате чего с выхода СФ через линию связи на ФД подается один фотон. Одновременно по сигналу УС ИИП формирует прямоугольный импульс стробирования длительностью Δt , который также поступает на вход ФД, увеличивая напряжение его смещения до значений, превышающих напряжение пробоя, тем самым, переводя ФД в режим счета фотонов. Поступающий в канал связи отдельный фотон излучения регистрируется ФД и на нагрузочном резисторе R_n формируется так называемый однофотонный импульс напряжения, поступающий через РК - C_1 на вход усилителя. После усиления импульс подается на вход АД, выделяющего однофотонный импульс на фоне собственных шумов усилителя и отделяющего импульсы помех, возникающие за счет прохождения импульса стробирования через собственную емкость ФД и РК -

C_1 на вход усилителя. Отметим, что импульсы помех имеют амплитуду, более чем в пять раз, превышающую среднюю амплитуду одноквантового импульса. С выхода АД однофотонный импульс поступает на вход СИ, где он регистрируется. Наряди с этими, одним из основных устройств квантовой системы является фотонный коммутатор, разработка которого представляет определенный практический и теоретический интерес.

Разработка фотонного коммутатора квантовой системы. Фотонный коммутатор должен обеспечивать передачу максимально возможного энергетического потенциала выходного сигнала квантовой системы передачи информации в оптическое волокно и из оптического волокна в приемник оптического сигнала. Сложность конструкции фотонного коммутатора передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи определяется характеристиками квантовой системы.

Как показали результаты анализа [12–16, 18], известен «Электромеханический переключатель оптических волокон» [21], в котором V –образная юстировочная канавка выполнена на цилиндрической поверхности диска, которая жестко закреплена на валу шагового двигателя, причем юстировочная канавка расположена параллельно оси вращения диска и в ней жестко установлен наконечник коммутирующего ОВ, а наконечники коммутируемых ОВ расположены по окружности встречно наконечнику коммутирующего ОВ и каждый из них находится в радиальном пазу неподвижного кольца, охватывающего диск и подпружинен в осевом и радиальном направлениях, при этом в радиальном направлении они контактируют с поверхностью расположения юстировочной канавки, а стыкуемые торцы наконечников имеют направляющую фаску. Данный переключатель включает в себя сравнительно большое количество механических элементов и узлов со сложной геометрической формой и конфигурацией, усложняющих конструкцию данного переключателя, а также не обеспечивает высокую точность переключения направления распространения сигналов оптического излучения, т.к. из-за сравнительно большой массы вращающего диска обладает определенной инерционностью. После остановки двигателя ввиду имеющихся люфтов точность процесса переключения уменьшается, что приводит к частичной потере энергии излучения передаваемого сигнала. Эксплуатационная надежность данной конструкции переключателя невысокая, т.к. оптические волокна, служащие каналами связи, находятся в подвижных состояниях.

Для достижения поставленной цели разработана схема фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи с использованием пьезоэлектрических биморфных элементов (ПБЭ) (рис. 3) и схема его управления (рис. 4) [15].

Пьезоэлектрический биморфный элемент, работающий на изгиб, являются перспективными в применении, т.к. они имеют максимально простую конструкцию и схему управления и составлен из двух пластин. При подаче напряжения на электроды одна из пластин, ввиду совпадения полярностей источника и полюсных электродов, происходит продольная деформация растяжения, в то время как другая ввиду обратной полярностей источника и полюсных электродов происходит деформация сжатия и в результате ПБЭ получает деформацию изгиба (на рис. 3 деформация изгиба ПБЭ показана пунктирными линиями). Кроме того, в качестве одной из пластин можно использовать не пьезоэлемент, а металлическая накладка такой толщины, чтобы пьезопластина лежала выше нейтрального слоя. Данное свойство ПБЭ было использовано при разработке фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи, в состав которого входят коммутируемые (1) и коммутирующие (2) оптические волокна с наконечниками на концах (наконечники на рис. 3 не показаны).

Указанные коммутирующие оптические волокна жестко установлены не менее чем в два ряда (3) на широкой грани планки (П) (4), а фотоэлектрические датчики установлены в сквозных отверстиях (5), выполненных на торцевых боковых гранях с нижней и верхней стороны указанной планки, совпадающих с отверстиями соответственно нижнего и верхнего ряда коммутирующих оптических волокон. Средство сканирования оптического сигнала (6) и его смещенное (7) положение при сканировании (траектория смещения сигнала квантовой системы квантовой системы на рис. 2 показана условно пунктирными линиями) коммутируемых оптических волокон соединены к светодиоду (СД) (8) (рис. 3, 4) с возможностью сканирования указанного сигнала оптического излучения через фокусирующую линзу (9) и адаптивное зеркальце (АЗ) (10), жестко закрепленном на рабочем конце первого ПБЭ (11) фотонного коммутатора с возможностью сканирования сигнала квантовой системы передачи при его отклонении (12) (траектория движения на рис. 3 показано условно пунктирными линиями). Первый ПБЭ (11) сканирования сигнала

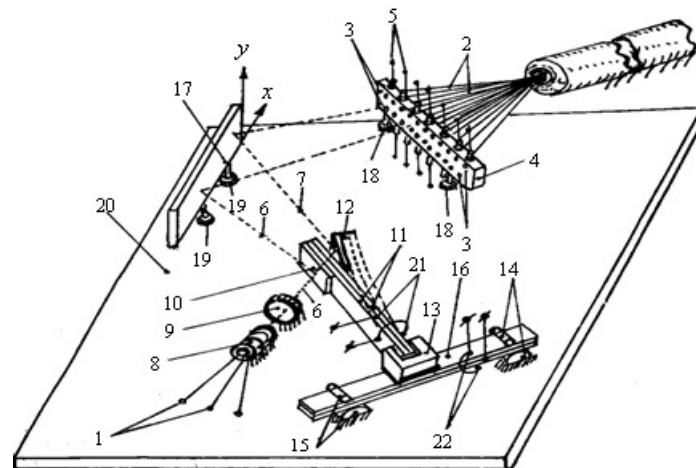


Рис. 3. Схема фотонного коммутатора передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи

квантовой системы по горизонтальной оси «Х» через крепежный переходник (13) шарнирно (14, 15) установлен на втором ПБЭ (16) сканирования сигналов квантовой системы по вертикальной оси «У» и имеет возможности отражения сигнала квантовой системы через зеркало – отражатель (30) (17) к отверстиям указанной планки. Планка с помощью стоек (18) и зеркало-отражатель (17) с помощью стоек (19) закреплены на основании (20) фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи (рис. 3, 4). Электроды (21 и 22) ПБЭ фотонного коммутатора оси «Х» и «У» подключены соответственно к первому (23) и второму (24) блоку питания (БП) (рис. 4), к первому входу каждого из которых подключен регулятор напряжения (РН) (25, 26), а ко второму входу – задатчика (27, 28) номера канала связи (ЗНКС), к входу каждого из которых соединены соответственно фотоэлектрические датчики (ФЭД) (3) положения оптического сигнала первого и второго ряда каналов связи.

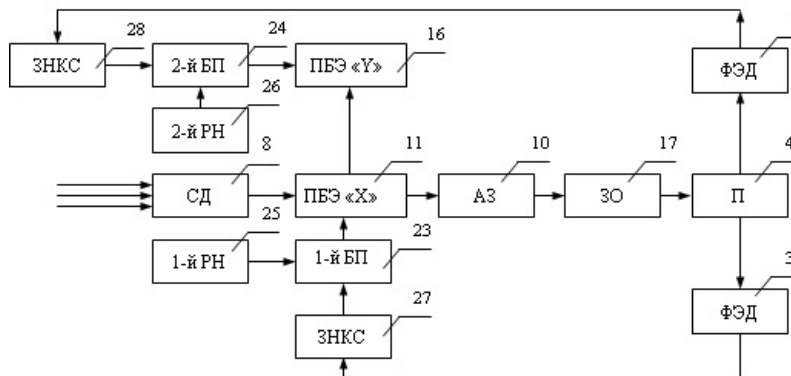


Рис. 4. Схема управления фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи

Принцип работы фотонного коммутатора квантовой системы. Электрический сигнал (1), подаваемый к светодиоду (8), преобразуется в оптический сигнал (6), который через оптическую линзу (9) направляется на адаптивное зеркальце (10). Отражаясь от адаптивного зеркальца (10), сигнал КС (6) попадает на зеркало-отражатель (17), а также за счет отражения от последнего попадает на одно из отверстий (3), например, верхнего ряда планки (4) коммутирующего оптического волокна. В соответствии с заданным номером коммутирующего оптического волокна в задатчике (27 и 28) номера канала связи устанавливается необходимый номер канала связи, т.е. уровень напряжения питания от источника (23, 24).

При включении источника питания, напряжение с выхода подается на электроды (21, 22) пьезоэлектрического биморфного элемента (11, 16), которое соответственно создает изгибную деформацию первого ПБЭ (11), которое приводит к смещению лучевого сигнала (6) относительно оси «Х», переводя его в положение (7) (на рис. 3 показано условно пунктирными линиями), при этом указанный сигнал с выхода фотонного коммутатора направляется на заданное коммутирующее ОВ, а также создает изгибную деформацию ПБЭ (16) относительно оси «У» переводя его в положение заданного ряда коммутирующих оптических волокон. Остановка и фиксация заданного положения фотонного коммутатора обеспечивается фотоэлектрическими датчиками (5), которые при появлении сигнала на выходе фотонного коммутатора квантовой системы в соответствии с заданным номером коммутирующего оптического волокна канала связи формирует сигнал воздействия на вход задатчика (27, 28) номера канала связи, приводящий к автоматическому установлению уровня напряжения питания в регуляторе (25, 26) относительно оси «Х» и оси «У», подводимого к ПБЭ соответственно.

Фотонный коммутатор квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи может работать и в режиме кратковременных передач выходного сигнала квантовой системы по различным каналам связи в соответствии с заданным алгоритмом с их кратковременным переключением через компьютер, который может быть введен в состав задатчика номера коммутирующего оптического волокна квантового канала связи.

Аналитический метод расчета параметров фотонного коммутатора квантовой системы

В связи с требованием достаточно высокой точности процесса фотонной коммутации и необходимостью автоматического управления направлением выходного сигнала фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи необходимо разработать аналитический метод определения параметров данного фотонного коммутатора квантовой системы, который позволил бы более точно оценить его технологические, механические и эксплуатационные характеристики. Рассмотрим некоторые из них.

При подаче напряжения с источника питания происходит изгибное колебание стержня пьезоэлектрического биморфного элемента с прямоугольным сечением, которое описывается нижеприведенным дифференциальным уравнением по формуле:

$$E \cdot I \frac{d^4 \eta}{dx^4} - \rho \cdot S \frac{d^2 \eta}{dt^2} = 0. \quad (2)$$

Согласно принципу действия фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи угол сканирования сигнала, т.е. угол между предельными его положениями определяется по следующей формуле:

$$\phi_{ск} = 4 \cdot \frac{d\phi}{du} = \frac{6d_{31} l_1 U_m}{l_3^2}, \quad (3)$$

где U_m – максимальная величина управляющего напряжения, при котором ПБЭ фотонного коммутатора сохраняет работоспособность в течение заданного срока службы (В); d_{31} – пьезомодуль изгибной деформации пьезокерамики; l_1, l_2, l_3 – соответственно длина, ширина и толщина ПБЭ.

Разрешение сканирования N определяется как отношение угла сканирования к углу собственной расходимости выходного сигнала фотонного коммутатора квантовой системы передачи θ :

$$N = \frac{\phi}{\theta} = \frac{6d_{31} \cdot A_i \cdot U_m}{k \lambda l_3^2}, \quad (4)$$

где A_i – размер зеркала в плоскости сканирования, м; λ – длина волны выходного сигнала квантовой системы, (м); k – коэффициент, определяемый конструкцией фотонного коммутатора и распределением световой энергии по апертуре зеркала (обычно $k = 1 \div 3$).

Однако исследования характеристик фотонного коммутатора квантовой системы передачи показывают, что уровень возбуждения ПБЭ фотонного коммутатора, устанавливаемого в нем согласно [21-24] выражается в единицах мощности, тока или напряжения. В случае верхнего предела, ограничивающего уровень возбуждения, наступает разрушение элемента. Ток не должен превышать 20мА/см² при колебаниях по толщине и 10мА/см² при продольных колебаниях.

Для обеспечения требуемой эксплуатационной надежности фотонного коммутатора квантовой системы передачи воспользуемся теорией изгиба упругой деформации прямоугольной пластинчатой пружины, закрепленной одним концом, при этом могут быть определены наибольшее напряжение в опасном сечении, момент инерции и величина амплитуды деформации изгиба по следующим формулам [16].

Длина ПБЭ фотонного коммутатора связана с пределом прочности и при его изгибе определяется следующим выражением:

$$l_1 = \frac{2\sigma_{изг.дон} l_2 l_3^2}{3F_{ПБЭ}}, \quad (5)$$

где $\sigma_{изг.дон}$ – предел прочности при изгибе ПБЭ фотонного коммутатора (Н/м²); $F_{ПБЭ}$ – сила, действующая на ПБЭ фотонного коммутатора (Н).

Амплитуда деформации свободного конца ПБЭ с зеркальцем определяется следующим образом:

$$\Delta_{изг.ПБЭ} = \frac{F_{ПБЭ} l_1^3}{3E_{Ю} J} = \frac{F_{ПБЭ}}{K_{ж\Sigma}}, \quad (6)$$

Момент инерции ПБЭ фотонного коммутатора определяется по следующей формуле:

$$J = \frac{l_2 \cdot l_3^3}{12}, \quad (7)$$

где $E_{Ю}$ – модуль Юнга (модуль упругости) пьезокерамики, т.е. физическая величина, характеризующая свойства материала сопротивляться растяжению, сжатию при упругой деформации; $F_{ПБЭ}$ – сила, действующая на ПБЭ фотонного коммутатора (пластинчатую пружину) (Н); J – момент инерции (м⁴).

Суммарная жесткость пластин ПБЭ фотонного коммутатора, составляющих стержень с прямоугольным сечением определяется следующим образом:

$$K_{ж\Sigma} = \frac{E_{Ю} \cdot l_2 \cdot l_3^3}{4 \cdot l_1^3}, \text{ Н/м.} \quad (8)$$

Разрушающую механическую нагрузку (наименьшее значение механической нагрузки, приложенной к пластинам ПБЭ в заданных условиях, вызывающее ее разрушение), возникающую на пластинах, составляющих ПБЭ фотонного коммутатора, можно определить по формуле:

$$\sigma_{изг.дон} = E_- d_{31} E_{Ю} Q_m, \quad (9)$$

где E_- – электрическая прочность (В/м), характеристика диэлектрика, минимальная напряженность электрического поля, при которой наступает электрический пробой; Q_m – механическая

добротность (ед.), т.е. критерия превышения резонанса в механической системе, способной к колебаниям, образованной пьезоэлектрической пластиной и характеризует потери энергии в свободно колеблющейся пластине.

Учитывая, что нагрузка ПБЭ фотонного коммутатора носит переменный характер с большим циклом переключений и допустимое значение напряжения должно быть ниже предела выносливости материала, необходимо выполнение следующего условия:

$$\sigma_{изг.дон} \leq 0,75 \cdot \sigma_{пр.изг} .$$

где Q_m – механическая добротность определяется экспериментально из амплитудно-частотной характеристики ПБЭ $\Delta_{изг.ПБЭ} = \phi(f)$ (рис. 5).

Амплитудно-частотная характеристика фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи была построена с применением стробоскопа, микроскопа и источника переменного напряжения. Все точки характеристики соответствуют амплитуде колебаний в начале и конце измерений. При кратности частоты питания (т.е. амплитуды колебаний конца ПБЭ фотонного коммутатора) частоте импульсных световых вспышек стробоскопа появлялась кажущаяся неподвижность, а при их малой разности очень медленное перемещение конца пластины с зеркальцем, которое фиксировалось.

Механическая добротность ПБЭ фотонного коммутатора определяется из амплитудно-частотной характеристики по следующей формуле:

$$Q_m = f_p / \Delta f ,$$

где Δf – ширина полосы пропускания; f_p – частота механического резонанса (Гц).

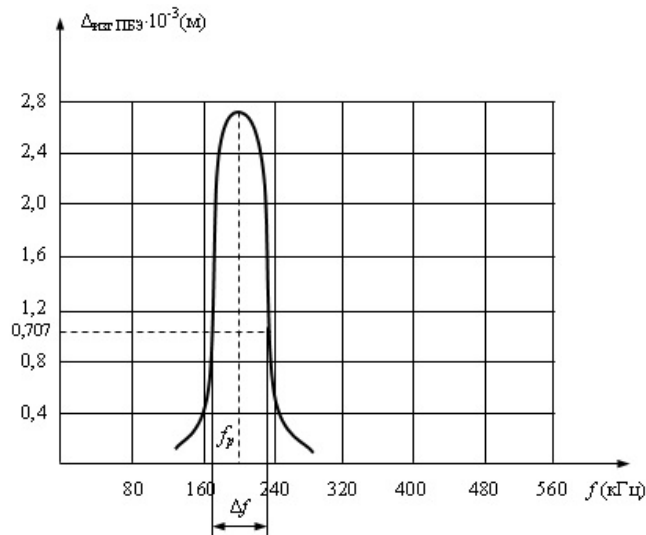


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика ПБЭ фотонного коммутатора квантовой системы

Быстродействие фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи зависит от частоты механического резонанса ПБЭ фотонного коммутатора, параметров электрической схемы источника питания и определяется по следующей формуле:

$$\tau_{l_1} = 1 / 2 \cdot f_p .$$

Подставляя значения выражения (9) в выражение (5) получим:

$$l_1 = 2E_- d_{31} E_{ю} Q_m l_2 l_3^2 / 3F_{БЭ} . \quad (10)$$

Полученное значение (10) подставим в выражение (3) и получим следующую формулу угла сканирования сигнала фотонного коммутатора квантовой системы передачи:

$$\phi_{ск} = 4 \cdot \frac{d\phi}{du} = \frac{6d_{31} l_1 U_m}{l_3^2} = \frac{12E_- d_{31} E_{ю} Q_m l_2 l_3^2 d_{31} U_m}{3F_{БЭ}} / l_3^2 = \frac{4E_- d_{31}^2 E_{ю} Q_m l_2 U_m}{F_{БЭ}} . \quad (11)$$

При перемещении конца ПБЭ фотонного коммутатора вместе с зеркальцем, закрепленном на нем, возникает инерционная сила, которая уравнивается силой упругости ПБЭ фотонного коммутатора, т.е.

$$F_{зерк} = m \cdot W_{зерк} , \quad (12)$$

где $F_{зерк}$ – сила инерции, создаваемая массой зеркальца (Н); m – масса зеркальца (кг·с²/м); $W_{зерк}$ – ускорение конца ПБЭ фотонного коммутатора с зеркальцем (м/с²).

Для обеспечения нормальной работы фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи необходимо выполнение следующего

условия:

$$F_{\text{ПБЭ}} \geq F_{\text{зерк}}.$$

Таким образом, получим следующую зависимость:

$$\Delta_{\text{изг.ПБЭ}} = m \cdot W_{\text{зерк}} / K_{\text{жс}}. \quad (13)$$

Учитывая выражения (8) в выражении (13) получим:

$$\Delta_{\text{изг.ПБЭ}} = \frac{4 \cdot l_1^3 \cdot m W_{\text{зерк}}}{E_{\text{ю}} l_2 l_3^2}. \quad (14)$$

Из выражения (14) определим ширину ПБЭ фотонного коммутатора:

$$l_2 = \Delta E_{\text{ю}} l_3^3 / 4m W_{\text{зерк}} l_1^3. \quad (15)$$

Подставляя (15) в выражение (11) и произведя определенные преобразования, получим выражение, являющееся аналитической записи принципа действия квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи:

$$\phi_{\text{СК}} = 4 \cdot \frac{d\phi}{du} = \frac{6d_{31} l_1 U_m}{l_3^2} = \frac{4E_{\text{ю}} d_{31}^2 E_{\text{ю}} Q_M l_2 l_3^2 U_m}{F_{\text{ПБЭ}} l_3^2} = \frac{4E_{\text{ю}} d_{31}^2 E_{\text{ю}} Q_M l_2 l_3^5}{m W_{\text{зерк}} l_1^3} / F_{\text{ПБЭ}} l_3^2 = \frac{E_{\text{ю}} d_{31}^2 E_{\text{ю}}^2 Q_M U_m \Delta_{\text{изг.ПБЭ}} l_3^2}{m W_{\text{зерк}}^3 F_{\text{ПБЭ}}}.$$

На основании проведенных экспериментальных исследований и полученных аналитических зависимостей были определены максимальная амплитуда деформации свободного конца ПБЭ фотонного коммутатора с зеркальцем, которая составила $\Delta = 2,8 \cdot 10^{-3}$ м, механическая добротность $Q_M = 6 - 7$ ед. и быстродействие ПБЭ:

$$\tau = 1 / 2f_{\text{рез}} = 1 / 2 \cdot 210 = 23 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

Как следует из выше полученных аналитических зависимостей, по которым были определены основные параметры фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи, а также погрешности экспериментально измеренных результатов, можно считать удовлетворительным и расхождение, между которыми составляет $1 \div 3\%$.

Выводы

Таким образом, значительное сокращение общего количества механических элементов и узлов со сложной геометрической формой и конфигурацией упрощает конструкцию предложенного фотонного коммутатора квантовой системы передачи информации и оптического шума по квантовому каналу связи.

Повышение точности работы фотонного коммутатора обеспечивается путем введения двух пьезоэлектрических биморфных элементов, обладающих сравнительно меньшей подвижной массой и, следовательно, меньшей инерционностью, а также за счет отсутствия механических люфтов узлов данного фотонного коммутатора.

Эксплуатационная надежность фотонного коммутатора повышается за счет того, что оптические волокна каналов связи не подвергаются деформации, т.е. находятся в неподвижном состоянии, т.к. сканирование сигналов квантовой системы осуществляется путем его отражения адаптивным зеркальцем через зеркало - отражатель к отверстиям планки коммутирующих оптических волокон.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Развития Науки при Президенте Азербайджанской Республики – Грант № EIF-BGM-3-BRFTF-2+/2017-15/07/1.

Литература

1. Гулаков И.Р. Фотоприемники квантовых систем / Гулаков И.Р., Зеневич А.О. – Минск : ВГКС, 2012. – 260 с.
2. Килин С.Я. Квантовая информатика / С.Я. Килин // Успехи физических наук. – 1999. – Т. 169. № 5. – С. 507–527.
3. Квантовая криптография: идеи и практика / [Килин С.Я., Хорошко Д.Б., Низовцев А.П. и др.]. – Минск : Беларус. Наука, 2007. – 391 с.
4. Курочкин В.Л. Экспериментальная установка для квантовой криптографии с одиночными поляризованными фотонами / В.Л. Курочкин, И.И. Рябцев, И.Г. Неизвестный // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75 (вып. 6). – С. 54–58.
5. Курочкин В.Л. Применение детекторов одиночных фотонов для генерации квантового ключа в экспериментальной оптоволоконной системе связи / В.Л. Курочкин, А.В. Зверев, Ю.В. Курочкин // Автотметрия. – 2009. – Т. 45. № 4. – С. 110–119.
6. Кулик С. Квантовая криптография. Часть 1 / С. Кулик // Фотоника. – 2010. – № 2. – С. 36–39.
7. Кулик С. Квантовая криптография. Часть 2 / С. Кулик // Фотоника. – 2010. – № 3. – С. 56–60.
8. Кулик С. Квантовая криптография. Часть 3 / С. Кулик // Фотоника. – 2010. – № 4. – С. 36–39.
9. Румянцев К.Е. Квантовая связь и криптография / Румянцев К.Е., Голубчиков Д.М. – Таганрог : Технологический институт Южного федерального университета, 2009. – 123 с.

10. Сыч Д.В. Анализ предельных возможных информационных характеристик протоколов квантовой криптографии / Д.В. Сыч, Б.А. Гришин, В.Н. Задков // Квантовая электроника. – 2005. – № 35. – С. 80, 81.
11. Хорошко Д.Б. Квантовая криптография: индивидуальный перехват с учетом протокола коррекции ошибок / Д.Б. Хорошко // Квантовая электроника. – 2007. – № 35. – С. 1105–1108.
12. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы : сборник статей / под ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. – М. : Connect, 2000. – 376 с.
13. Портнов Э.Л. Оптические кабели связи и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи / Портнов Э.Л. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 486 с.
14. Розеншер Э. Оптоэлектроника / Розеншер Э., Винтер Б. – М. : Техносфера, 2006. – 595 с.
15. Шарупич Л.С. Оптоэлектроника / Шарупич Л.С. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 256 с.
16. Гроднев И.И. Волоконно-оптические линии связи / Гроднев И.И. – М. : Радио и связь, 1990. – 224 с.
17. Гроднев И.И. Волоконно-оптические системы передачи и кабели : справочник / Гроднев И.И. и др. – М. : Радио и связь, 1993. – 294 с.
18. Иванов А.Г. Волоконная оптика: Компоненты, системы передачи, измерения / Иванов А.Г. – М. : Компания Сайрус системс, 1999. – 327 с.
19. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М. : Техносфера, 2006. – 496 с.
20. Гауэр Дж. Оптические системы связи / Гауэр Дж. – М. : Радио и связь, 1989. – 504 с.
21. А.с. СССР 1322850 А1. Электромеханический переключатель оптических волокон. МКИ G02В - 6/38 от 22.04.85.
22. Балкаров О.М. Световые отклоняющие устройства на пьезокерамике / О.М. Балкаров, Ю.В. Манюшкин / Изв. ВУЗ-ов СССР. – М. : Машиностроение, 1972. – XVI № 9. – С. 112–115.
23. Смагин А.Г. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы / Смагин А.Г., Ярославский М.И. – М. : Энергия, 1970.
24. Смажевская В.Г. Пьезоэлектрическая керамика / Смажевская В.Г., Фельдман Н.В. – М. : Сов. радио, 1971. – 200 с.

References

1. Gulakov I.R. Fotopriemniki kvantovyih sistem / Gulakov I.R., Zenevich A.O. – Minsk : VGKS, 2012. – 260 s.
2. Kilin S.YA. Kvantovaya informatika / S.YA. Kilin // Uspehi fizicheskikh nauk. – 1999. – T. 169. № 5. – S. 507–527.
3. Kvantovaya kriptografiya: idei i praktika / [Kilin S.YA., Horoshko D.B., Nizovtsev A.P. i dr.]. – Minsk : Belarus. Nauka, 2007. – 391 s.
4. Kurochkin V.L. Eksperimentalnaya ustanovka dlya kvantovoy kriptografii s odinochnymi polarizovannymi fotonami / V.L. Kurochkin, I.I. Ryabtsev, I.G. Neizvestnyy // Jurnal tehnicheckoy fiziki. – 2005. – T. 75 (vyip. 6). – С. 54–58.
5. Kurochkin V.L. Primenenie detektorov odinochnykh fotonov dlya generatsii kvantovogo klyucha v eksperimentalnoy optovolokonnoy sisteme svyazi / V.L. Kurochkin, A.V. Zverev, YU.V. Kurochkin // Avtometriya. – 2009. – T. 45. № 4. – С. 110–119.
6. Kulik C. Kvantovaya kriptografiya. CHast 1 / C. Kulik // Fotonika. – 2010. – № 2. – С. 36–39.
7. Kulik C. Kvantovaya kriptografiya. CHast 2 / C. Kulik // Fotonika. – 2010. – № 3. – С. 56–60.
8. Kulik C. Kvantovaya kriptografiya. CHast 3 / C. Kulik // Fotonika. – 2010. – № 4. – С. 36–39.
9. Rumyantsev K.E. Kvantovaya svyaz i kriptografiya / Rumyantsev K.E., Golubchikov D.M. – Taganrog : Tehnologii-cheskiy institut YUjnogo federalnogo universiteta, 2009. – 123 s.
10. Syich D.V. Analiz predelnykh vozmozhnykh informatsionnykh harakteristik protokolov kvantovoy kriptografii / D.V. Syich, B.A. Grishin, V.N. Zadkov // Kvantovaya elektronika. – 2005. – № 35. – С. 80, 81.
11. Horoshko D.B. Kvantovaya kriptografiya: individualnyy perehvat s uchetoм protokola korraktsii oshibok / D.B. Horoshko // Kvantovaya elektronika. – 2007. – № 35. – С. 1105–1108.
12. Volokonno-opticheskaya tehnika: istoriya, dostijeniya, perspektivy : sbornik statey / pod red. Dmitrieva S.A., Slepova N.N. – М. : Connect, 2000. – 376 s.
13. Portnov E.L. Opticheskie kabeli svyazi i passivnyie komponentyi volokonno-opticheskikh liniy svyazi / Portnov E.L. – М. : Goryachaya liniya-Telekom, 2007. – 486 s.
14. Rozensher E. Optoelektronika / Rozensher E., Vinter B. – М. : Tehnosfera, 2006. – 595 s.
15. SHarupich L.S. Optoelektronika / SHarupich L.S. – М. : Energoatomizdat, 1984. – 256 s.
16. Grodnev I.I. Volokonno-opticheskie linii svyazi / Grodnev I.I. – М. : Radio i svyaz, 1990. – 224 s.
17. Grodnev I.I. Volokonno-opticheskie sistemyi peredachi i kabeli : cpravochnik / Grodnev I.I. i dr. – М. : Radio i svyaz, 1993. – 294 s.
18. Ivanov A.G. Volokonnaya optika: Komponentyi, sistemyi peredachi, izmereniya / Ivanov A.G. – М. : Kompaniya Sayrus sistems, 1999. – 327 s.
19. Friman R. Volokonno-opticheskie sistemyi svyazi / R. Friman. – М. : Tehnosfera, 2006. – 496 s.
20. Gauer Dj. Opticheskie sistemyi svyazi / Gauer Dj. – М. : Radio i svyaz, 1989. – 504 s.
21. А.с. SSSR 1322850 А1. Elektromehaniicheskiy pereklyuchatel opticheskikh volokon. MKI G02V -6/38 от 22.04.85.
22. Balkarov O.M. Svetovyye otklonyayushchie ustroystva na pezokeramike / O.M. Balkarov, YU.V. Manoskin / Izv. VUZ-ov SSSR. – М. : Mashinostroenie, 1972. – XVI № 9. – С. 112–115.
23. Smagin A.G. Pezoelektrichestvo kvartsa i kvartsevyye rezonatoryi / Smagin A.G., YAroslavskiy M.I. – М. : Energiya, 1970.
24. Smajevskaya V.G. Pezoelektricheskaya keramika / Smajevskaya V.G., Feldman N.V. – М. : Sov. radio, 1971. – 200 s.

Рецензія/Peer review : 22.10.2018 р.

Надрукована/Printed : 22.11.2018 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Мусаев В.Г.