

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ПОИСК ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В РЕЖИМЕ РЕГИСТРАЦИИ ПОТОКА ФОТОНОВ С УДЛИНЕНИЕМ ВРЕМЕНИ НАБЛЮДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТА РАЗЛОЖЕНИЯ

© К. Б. Баматгиреева

*ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова, г. Грозный, Россия*

Предложен алгоритм синхронизации двухпроходной системы распределения квантового ключа (QKDS) с фазово-кодированными состояниями фотонов. Алгоритм реализован в однофотонном режиме для обеспечения повышенной безопасности процесса входа в соединение. Особенностью алгоритма является то, что для равного количества накопленных импульсов в двух смежных временных интервалах принимается решение о приеме импульса фотона в любом из этих интервалов, если количество накопленных импульсов в нем превышает количество обнаруженных импульсов в других интервалах.

Лазерные системы связи отличаются от прочих систем передачи только особенностями построения линейного тракта, который включает, помимо среды распространения, совокупность технических средств для формирования, передачи, распределения, преобразования и обработки оптических сигналов в заданной полосе частот или с фиксированной пропускной способностью, определяемых номинальным числом каналов передачи. Согласно известным алгоритмам [1, 2, 9, 10] в этом случае оба интервала стали «зашумленными», что послужило причиной пропуска сигнальных импульсов.

**Ключевые слова:** пространственный поиск, однофотонный импульс, одноканальная регистрация, сканирующий однофотонный фотоэмиссионный прибор.

Лазерные системы связи отличаются от прочих систем передачи только особенностями построения линейного тракта, который включает помимо среды распространения совокупность технических средств для формирования, передачи, распределения, преобразования и обработки оптических сигналов в заданной полосе частот или с фиксированной пропускной способностью, определяемых номинальным числом каналов передачи. Лазерные системы связи обладают потенциально высокой пропускной способностью, помехозащищенностью и, как следствие, повышенной степенью защиты информации, безопасностью и живучестью.

В оптических системах связи важнейшей проблемой наряду с синхронизацией и передачей информации является проблема обеспечения условий, при которых излученный сигнал попадает в приёмное устройство. Это означает, что в системе связи необходимо точно навести

оптический луч передающей аппаратуры удалённого корреспондента на приёмное устройство другого корреспондента. Кроме того, приёмное устройство должно точно определить направление прихода оптического луча передатчика.

Операции по нацеливанию оптического луча передатчика в требуемом направлении принято называть наведением. Операции в приёмном устройстве по определению направления прихода оптического луча будем называть пространственным поиском и обнаружением. Проблемы пространственного поиска удалённого корреспондента, наведения передающих и приемных антенн, обнаружения оптических сигналов и пространственного сопровождения корреспондента особенно остро стоят в оптических системах связи открытого типа как вследствие экстремально узких оптических лучей, так и за счёт больших дальностей распространения излучения. При решении задачи

пространственного обнаружения необходимо, чтобы антенна приёмной аппаратуры наводилась точно по направлению прихода оптического излучения. При этом вектор нормали к поверхности приёмной антенны должен быть совмещён с направлением прихода оптического луча.

Известны оптические системы связи, в том числе космические, в которых на каждом объекте-носителе установлены взаимодействующие между собой комплексы приёмопередающей аппаратуры (КППА). В качестве объектов в космической технике могут быть космические аппараты, орбитальные станции и т.д. При этом одним из объектов может быть стационарный или подвижный наземный пункт, воздушное или водное судно, подводный объект. В этих системах источник сообщений посылает информационные электрические сигналы на вход оптического передатчика КППА данного объекта. Оптический передатчик этими сигналами модулирует поток сигналов оптической несущей, который через оптическую систему излучается в канал связи. Канал связи реализуется каналобразующей средой, в качестве которой выступает свободное пространство (открытое космическое пространство, атмосфера Земли). Излученные оптические сигналы распространяются в канале связи, достигают оптической системы КППА другого объекта, собираются оптической системой этого КППА в пучок и подаются далее на вход оптического приёмника, где преобразуются в электрические сигналы, которые направляются в устройства их обработки, осуществляющие, например, усиление и фильтрацию сигналов для выделения передаваемых сообщений.

Системы оптической связи используют электромагнитные излучения оптического диапазона с длиной волны единицы и доли микрометров. Диаграммы направленности излучения оптических сигналов этих систем имеют углы раствора, составляющие единицы микро радиан.

В системах оптической связи, в которых канал связи между КППА представляет собой открытое пространство, требуется вначале осуществить операции по организации связи

между КППА. Для этого первоначально комплексы на каждом из объектов производят взаимный поиск оптических сигналов, посылаемых КППА другого объекта. После обнаружения и «захвата» приходящих оптических сигналов каждый КППА осуществляет в течение определённых временных интервалов работу в режиме высокоточного слежения и наведения с замкнутой обратной связью по управлению. Продолжительность высокоточного слежения и наведения может достигать, например в системах оптической связи между КА на геостационарной орбите, нескольких месяцев и даже лет. Если происходит нарушение в работе таких систем, то для восстановления функционирования системы повторяются операции взаимного пространственного поиска и обнаружения оптических сигналов, посылаемых другим КППА.

*Таким образом, в составе комплексов приёмопередающей аппаратуры мобильной системы оптической связи, предназначенной для работы в свободном пространстве, должны присутствовать средства пространственного поиска и обнаружения источников оптического излучения.*

В системах оптической связи, в которых каналобразующей средой является космическое пространство, процесс поиска и «захвата» между КППА осуществляется по командам, поступающим от ЭВМ, находящихся на каждом объекте. Этот процесс начинается в заранее установленное время и производится по расчётным данным о направлении (эфемеридам) линии, соединяющей КППА.

Высокая направленность оптических антенн требует расчёта и выдачи достаточно точных целеуказаний по угловым координатам корреспондента. Для КППА, установленного на кооперируемом объекте, рассчитываются эфемериды направления на объект-корреспондент, а для КППА, установленного на объекте-корреспонденте, – эфемериды направления на кооперируемый объект. По этим эфемеридам осуществляется предварительное выставление визирной оси каждого КППА в положение, соответствующее моменту начала их взаимного поиска при организации оптиче-

ской связи между ними. В процессе поиска и «захвата» не используются вспомогательные каналы связи радиодиапазона. Для выработки необходимых данных о направлении линии, соединяющей оба КППА, в момент начала их взаимного поиска используются средства, не входящие в состав КППА. Эти данные поступают в КППА от средств объекта-носителя КППА. Они вырабатываются непосредственно на данном объекте или наземным комплексом управления с последующей передачей на объект в виде кодовых сообщений.

Формирование данных о направлении линии, соединяющей оба КППА, осуществляется на основании определения параметров траекторий объектов, между которыми планируется установить связь в оптическом диапазоне. В свою очередь, определение параметров траекторий этих объектов производится по результатам траекторных измерений, которые ведутся средствами наземного измерительного комплекса.

Для минимизации времени вхождения в связь стремятся по возможности уменьшить ошибку поиска излучения КППА другого объекта, в связи с чем траекторные измерения для определения параметров траекторий космических объектов проводят как можно ближе к моменту начала работы системы космической оптической связи. Это вызывает дополнительные трудности в работе космических и наземных средств из-за сокращения времени на проведение подготовительных операций к сеансу оптической связи.

Погрешности знания направления линии, соединяющей оба КППА, в момент начала их взаимного поиска создают ошибку поиска в системе. Суммарная ошибка поиска зависит от точности знания местоположения каждого объекта системы космической оптической связи: точности знания параметров их траекторий, от точности знания их ориентации в пространстве, определяемой точностью управления движением как подвижных частей КППА, так и самих объектов, а также от возмущающих факторов окружающей среды.

В процессе работы космических систем оптической связи требуется постоянное при-

влечение дополнительных средств для организации связи, непосредственно не входящих в состав систем связи. Поэтому, несмотря на обладание неоспоримыми достоинствами по помехозащищенности, электромагнитной совместимости, высокой скорости передачи информации, минимальным массовым и энергетическим затратам, известные системы космической оптической связи требуют значительных дополнительных затрат как по объёму (трудоемкости) работ для организации связи и навигационного обеспечения функционирования систем, так и в стоимостном выражении. Такая особенность эксплуатации известных систем космической оптической связи не позволяет в должной мере использовать их достоинства без средств организации оптической связи (пространственного поиска и обнаружения оптических сигналов), а главное – не позволяет повысить оперативность доставки потребителям необходимой информации при одновременной минимизации затрат.

Все разработчики лазерных систем связи с мобильными объектами столкнулись с проблемой наведения антенных комплексов, пространственного поиска, обнаружения, автоматического сопровождения корреспондента.

В настоящее время существует аппаратура для пространственного поиска и обнаружения источников оптического излучения, но вопрос об оптимизации ее характеристик по-прежнему актуален, особенно при реализации аппаратуры на основе сканирующих фотоприемников.

В режиме вхождения в связь момент появления импульсного сигнала на приёмном конце считается неизвестным.

Задача приема и обработки оптических сигналов важна в системах связи, локации, навигации, системах квантовой криптографии. В режиме вхождения в связь момент появления импульсного сигнала на приёмном конце считается неизвестным. Организация пространственно-временного поиска с целью обнаружения и выделения момента появления оптического импульса является необходимым условием вхождения в связь между движущимися корреспондентами (синхронизм) приемно-передающего комплекса.

Работа аппаратуры в режиме регистрации отдельных фотонов предполагает применение высокочувствительных одноэлектронных фотоприемников, к выходу которых подключаются фотоэлектронные счетчики, регистрирующие число фотоэлектронов, принимаемых за заданный временной интервал наблюдения. В случае регистрации импульсного излучения время наблюдения пространственного элемента разложения ограничено, а среднее число регистрируемых за длительность светового импульса фотоэлектронов велико. Это приводит к некоторым особенностям обработки информации, отличающимся от известных.

Постоянное совершенствование и усложнение лазерных поисковых комплексов требует развития теории пространственно-временного поиска подвижных источников излучения, синтеза оптимальных структур обнаружителей оптических сигналов, описания принципов работы, конструкторских особенностей и характеристик фотоприемных устройств.

Предельные параметры фотоприёмной аппаратуры реализуются при использовании однофотонных фотоприёмников, позволяющих регистрировать акты преобразования фотона в фотоэлектрон (ФЭ) – первичный электрон. В [2-7] описываются временные методы обработки информации в аппаратуре поиска с однофотонным фотоэмиссионным прибором (ОФЭП), синтезируются алгоритмы пространственно-временного поиска импульсного излучения, оптимизируются параметры и даётся методика проектирования аппаратуры пространственно-временного поиска источников импульсного излучения.

В [9] приведено описание алгоритма пространственно-временного поиска импульсных сигналов в режиме одноканальной регистрации однофотонных импульсов. Установлены количественные соотношения для описания временных параметров комплекса поиска источников импульсного излучения при использовании сканирующего ОФЭП с ограниченной полосой пропускания в режиме регистрации однофотонных импульсов (ОФИ).

В [10] определены количественные соотношения для расчёта вероятностных характе-

ристик комплекса пространственно-временного поиска источников импульсного излучения с одноканальной обработкой информации при использовании сканирующего ОФЭП, обеспечивающие приемлемую погрешность инженерных расчётов. Получены выражения, устанавливающие связь вероятности ложной тревоги с длительностью, периодом и нестабильностью следования оптических импульсов, параметрами ОФЭП (числа диодов, полосы пропускания), пороговым уровнем амплитудной дискриминации, частотой генерации однофотонных импульсов фонового излучения и импульсов темнового тока (ИТТ). Подтверждено, что для снижения вероятности ложной тревоги следует генерировать оптические импульсы наносекундной и пикосекундной длительности, предъявляя жёсткие требования к стабильности частоты следования последних. Доказан квадратичный характер изменения вероятности ложной тревоги от среднего числа шумовых импульсов за период следования оптических импульсов. Показано, что уменьшение в 10 раз частоты появления шумовых импульсов позволяет в 100 раз снизить вероятность ложной тревоги и, как следствие, уменьшить среднее время пространственно-временного поиска импульсных сигналов в режиме регистрации однофотонных импульсов. Предложены приближённые формулы для расчёта вероятности ложной тревоги, дающие верхнюю и нижнюю оценки значениям вероятности. Получено выражение для расчёта вероятности правильного обнаружения полезного излучения, представляющее произведение трёх вероятностей: усреднённой вероятности отсутствия регистрации шумового импульса до момента появления оптического импульса, вероятности срабатывания АД во время действия оптического импульса на первом этапе анализа элемента разложения и вероятности срабатывания АД во время действия импульса стробирования. Наконец, сформулированы требования к выбору значений периода и частоты следования оптических импульсов. Показано, что для обеспечения вероятности правильного обнаружения более 90% среднее число ОФИ полезного излучения в импульсе должно превышать 3.

В [1] установлены количественные соотношения для расчёта временных параметров приёмно-передающего комплекса поиска источников импульсного излучения при использовании сканирующего ОФЭП с одноканальной обработкой информации, обеспечивающие приемлемую погрешность инженерных расчётов. Получено выражение для расчёта среднего времени наблюдения фонового пространственного элемента разложения. Показано, что различие между средним временем наблюдения пространственного элемента разложения и периодом следования импульсов при выполнении определённых условий не превышает 20%. Доказана возможность использования приближённой формулы для расчёта среднего времени наблюдения фонового пространственного элемента разложения с погрешностью не более 1,0%.

Область применения описанного алгоритма пространственно-временного поиска импульсного излучения с одноканальной обработкой информации ограничена поиском источников излучения в условиях воздействия на фотоприёмник фонового излучения слабой интенсивности. Действительно, как показано в [1], для уверенного выделения сигнала частота следования импульсов должна быть соизмерима с предельно реализуемой в настоящее время для обмена информацией между движущимися корреспондентами (порядок единиц мегагерц). Кроме того, в случае отсутствия превышения уровня дискриминации при повторном анализе аппаратура прекращает просмотр элемента разложения. Следовательно, для увеличения вероятности правильного обнаружения необходимо продолжить обследование до момента, кратного периоду следования оптических импульсов.

*Цель исследований состоит* в расширении диапазона успешного пространственно-временного поиска и обнаружения импульсных сигналов в условиях воздействия фонового излучения с большей интенсивностью в режиме регистрации потока фотонов при одноканальной обработке информации с удлинением времени наблюдения элемента разложения.

Предложен алгоритм поиска, предполагающий до двух срабатываний аппаратуры поис-

ка импульсного излучения в процессе наблюдения элемента разложения с одноканальной обработкой информации в режиме регистрации потока фотонов. Пространственно-временной поиск с выделением момента прихода оптических сигналов основан на том, что на приёмном конце поискового комплекса известны длительность и период следования (частота) оптических импульсов. В течение времени фиксируется момент первого превышения порогового уровня амплитудного дискриминатора, анализ причины которого производится в последующем интервале. Принимаемое оптическое излучение преобразуется фотокатодом ОФЭП в поток фотоэлектронов. Использование электронной диодной системы в ОФЭП позволяет получить отклик в виде ОФИ на каждый сгенерированный фотоэлектрон. Амплитуда ОФИ значительно превышает уровень тепловых шумов их нагрузки. Для ограничения подачи импульсов темного тока с анода ОФЭП на вход схемы обработки применяется амплитудная дискриминация с пороговым уровнем.

Пусть аппаратурой поиска зарегистрирован фотоэлектрон (или ИТТ) в момент при обзоре пространственного элемента разложения. При этом аппаратура становится нечувствительной к приёму ФЭ и ИТТ в интервале. Здесь соответствует моменту начала действия импульса стробирования во время повторного обследования. Время задержки между моментом срабатывания АД и моментом генерации 1-го фотоэлектрона (или ИТТ) равно. Повторный опрос производится в интервале. Здесь соответствует моменту окончания действия импульса стробирования во время повторного обследования.

В случае отсутствия превышения уровня дискриминации при повторном анализе аппаратура продолжает обследование временного интервала.

Пусть в процессе продолжения обследования пространственного элемента разложения вновь зафиксировано срабатывание АД. Аппаратура переходит в режим ожидания. Повторный опрос производится во время действия второго импульса стробирования. Если сраба-



тывает АД, то принимается решение о приёме сигнала. В противном случае принимается решение о прекращении обследования пространственного элемента разложения.

К вероятностным характеристикам аппаратуры пространственно-временного поиска импульсных сигналов в режиме регистрации фотонов (видеоимпульсов с однофотонного ФЭП) следует отнести вероятности ложных тревог и правильного обнаружения источника полезного оптического излучения.

### **Вероятность ложной тревоги**

Для описания статистических свойств потока фотонов (фотоэлектронов) используется распределение Пуассона.

Из формулы (20) видно, что для снижения вероятности ложных тревог следует генерировать оптические импульсы наносекундной и пикосекундной длительности, предъявляя жесткие требования к стабильности частоты следования последних.

Вероятность ложных тревог зависит от длительности и периода следования прямоугольного оптического импульса, нестабильности периода следования оптических импульсов, параметров однофотонного фотоэмиссионного прибора (числа диодов, полосы пропускания ОФЭП), порогового уровня амплитудной дискриминации, частоты генерации шумовых импульсов.

Как и следовало ожидать, с ростом среднего числа шумовых импульсов, генерируемых за период следования оптических импульсов, вероятность ложных тревог возрастает. Уменьшение в 10 раз частоты появления шумовых импульсов позволяет в 100 раз снизить вероятность ложных тревог и, как следствие, уменьшить среднее время пространственно-временного поиска импульсных сигналов в режиме регистрации однофотонных импульсов.

Анализ показывает, что платой за допустимость в аппаратуре двух ложных срабатываний при обзоре пространственного элемента разложения является увеличение вероятности ложной тревоги. Это эквивалентно требованию генерации передатчиком поискового комплекса

световых импульсов меньшей длительности. Однако различие в значениях Рлт не велико.

**Вероятность правильного обнаружения.** Получено выражение для расчёта вероятности правильного обнаружения полезного излучения, представляющее произведение трёх вероятностей: усреднённой вероятности отсутствия регистрации шумового импульса до момента появления оптического импульса, вероятности срабатывания АД во время действия оптического импульса на первом этапе анализа элемента разложения и вероятности срабатывания АД во время действия импульса стробирования.

Установлено, что для получения высоких вероятностей правильного обнаружения необходимо среднее число фоновых ФЭ и ИТТ за период следования оптических импульсов не должно превышать 1. При этом вероятность прекращения обзора пространственного элемента разложения, не приступив к анализу сигнального временного интервала, не превышает 0,1. Последнее указывает на необходимость выбора частоты следования импульсов сигнала, исходя из условия.

**Вывод.** Аппаратура поиска и выделения оптических импульсных сигналов показывает, что допустимость двух ложной тревоги позволяет в 5 раз снизить требования к частоте следования световых сигналов. В силу того, что требования к энергии в импульсе одинаковы, в рассматриваемом случае удастся в 5 раз снизить мощность излучения передатчика.

Исследование алгоритма пространственно-временного поиска и выделения оптических импульсных сигналов показывает, что даже в случае полного исключения фонового излучения и темнового тока для правильного обнаружения полезного излучения с вероятностью 0,9 среднее число фотоэлектронов (энергия) в импульсе должно быть более трех. В этих условиях вероятность приёма более одного сигнального фотоэлектрона за длительность светового импульса весьма близка к 1. В то же время вероятность регистрации двух и более фоновых фотоэлектронов за длительность оптического импульса пренебрежимо мала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Албогачиева Л. А., Румянцев К. Е. Временные характеристики алгоритма одноканального пространственно-временного поиска импульсного излучения // XXI век: Итоги прошлого и проблемы настоящего *плюс*. Серия «Технические науки. Информационные технологии»: Научно-методический журнал. 2014. №3 (20). С. 62-69.
2. Бычков С. И., Румянцев К. Е. Поиск и обнаружение оптических сигналов: Монография / Под ред. К. Е. Румянцева. М.: Радио и связь, 2000. 282 с.
3. Румянцев К. Е. Регистрация факта приема многофотонного импульса в системе квантового распределения ключа на основе однофотонного фотоэлектронного умножителя // Радиотехника. 2011. №11. С. 67-69.
4. Румянцев К. Е., Амплиев А. Е. Требования к двоичному счетчику для регистрации потока фотонов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2011. Вып. 5. С. 79-91.
5. Румянцев К. Е., Суковатый А. Н. Методы селекции шумовых одноэлектронных импульсов: Обзор // Радиотехника. 2004. №6. С. 56-61.
6. Румянцев К. Е., Хайров И. Е. Регистрация оптического излучения в поисковых системах астронавигации и астроориентации с временной селекцией одноэлектронных импульсов // Авиакосмическое приборостроение, 2004. №8. С. 45-49.
7. Румянцев К. Е., Хайров И. Е. Защита информации в фотонных телекоммуникационных системах – новая технология передачи данных // Известия ТРТУ. 2003. №4. С. 329-330.
8. Румянцев К. Е., Омар М. Х., Хайров И. Е. Рабочие характеристики оптимальных приёмников оптического излучения // Радиотехника. 2003. №10. С. 39-44.
9. Румянцев К. Е., Албогачиева Л. А., Баматгиреева К. Б. Алгоритм пространственно-временного поиска импульсных сигналов в режиме одноканальной регистрации однофотонных импульсов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8, №4. С. 3-11.
10. Румянцев К. Е., Баматгиреева К. Б. Вероятностные характеристики алгоритма пространственно-временного поиска импульсного излучения с одноканальной обработкой информации // XXI век: Итоги прошлого и проблемы настоящего *плюс*. Серия «Технические науки. Информационные технологии»: Научно-методический журнал. 2014. №3 (20). 208 с. С. 70-77.

## EXISTENTIAL SEARCH PULSED EMISSION IN REGISTRATION MODE OF PHOTON FLUX WITH EXTENSION TIME OF OBSERVATION ELEMENTS OF DECOMPOSITION

© K. B. Bamatgireeva

GSTOU named acad. M. D. Millionshchikov, Grozny, Russia

The proposed synchronization algorithm is two-pass system of quantum key distribution (QKDS) with the phase-encoded States of photons. The algorithm is implemented in single-photon mode to provide increased security of the connection entry process. The peculiarity of the algorithm is that for an equal number of accumulated pulses in two adjacent time intervals, a decision is made to receive a photon pulse in any of these intervals, if the number of accumulated pulses in it exceeds the number of detected pulses in other intervals.

Laser communication systems differ from other transmission systems only in the construction of a linear path, which includes, in addition to the propagation medium, a set of technical means for the formation, transmission, distribution, conversion and processing of optical signals in a given frequency band or with a fixed bandwidth determined by the nominal number of transmission channels. According to the known algorithms [1, 2, 9, 10] in this case, both intervals became “noisy”, which caused the omission of signal pulses.

**Keywords:** spatial search, single-photon pulse, single-channel registration, scanning single-photon photoemission device.

### REFERENCES

1. Albogachieva, L. A. and Rumyantsev, K. E. (2014) Vremennye kharakteristiki algoritma odnokanal'nogo prostranstvenno-vremennogo poiska impul'snogo izlucheniya'. *XXI vek: Ito-gi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus. Seriya «Tekhnicheskie nauki. Informatsionnye tekhnologii»: Nauchno-metodicheskii zhurnal* [Temporal characteristics of the algorithm of a single-channel spatio-temporal search for pulsed radiation. XXI Century: Results of the past and problems of the present plus. Series “Engineering. Information Technologies”: Scientific and Methodological Journal]. №3 (20). S. 62-69.
2. Bychkov, S. I. and Rumyantsev, K. E. Poisk i obnaruzhenie opticheskikh signalov: Monografiya pod red. K. E. Rumyantseva. M.: Radio i svyaz' [Search and Detection of Optical Signals: Monograph in K. E. Rumyantsev (ed.). M.: *Radio and communications*], 282 p.
3. Rumyantsev, K. E. (2011) ‘Registratsiya fakta priema mnogofotonnogo impul'sa v sisteme kvantovogo raspredeleniya klyucha na osnove odnofotonnogo fotoelektronnoho umnozhatelya’. *Radiotekhnika* [Registration of the fact of receiving a multiphoton pulse in a quantum key distribution system based on a single-photon photomultiplier. Radio Engineering]. № 11. Pp. 67-69.
4. Rumyantsev, K. E. and Ampliev, A. E. (2011) ‘Trebovaniya k dvoichnomu schetchiku dlya registratsii potoka fotonov’ *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [Requirements for a binary counter for registering a photon flux. News of Russian Universities. Radio Electronics]. Vyp. 5. Pp. 79-91.
5. Rumyantsev, K. E. and Sukovaty, A. N. (2004) ‘Metody selektsii shumovykh odnoelektronnykh impul'sov: Obzor’. *Radiotekhnika* [Methods for the selection of noise single-electron pulses: Review].
6. Rumyantsev, K. E. and Khairov, I. E. (2004) ‘Registratsiya opticheskogo izlucheniya v poiskovykh sistemakh astronavigatsii i astroorientatsii s vremennoi selektsiei odnoelektronnykh impul'sov’. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Registration of optical radiation in search engines of astronavigation and astroorientation with temporary selection of single-electron pulses Aerospace Instrumentation]. №8. Pp. 45-49.



7. Rummyantsev, K. E. and Khairov, I. E. (2003) 'Zashchita informatsii v fotonnykh telekommunikatsionnykh sistemakh – novaya tekhnologiya peredachi dannykh'. *Izvestiya TRTU* [Information protection in photon telecommunication systems – a new technology for data transfer. Bulletin of TRTU]. №4. Pp. 329-330.
8. Rummyantsev, K. E., Omar, M. Kh. and Khairov, I. E. (2003) 'Rabochie kharakteristiki optimal'nykh priemnikov opticheskogo izlucheniya'. *Radiotekhnika* [Performance characteristics of optimal optical radiation receivers. Radio Engineering]. №10. Pp. 39-44.
9. Rummyantsev, K. E., Albogachieva, L. A. and Bamatgireeva, K. B. (2012) 'Algoritm prostranstvenno-vremennogo poiska impul'snykh signalov v rezhime odnokanal'noi registratsii odnofotonnykh impul'sov' *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [The spatio-temporal search algorithm for pulse signals in the single-channel single-photon pulse registration mode. Electrical and Information Complexes and Systems]. V. 8. №4. Pp. 3-11.
10. Rummyantsev, K. E. and Bamatgireeva, K. B. (2014) 'Veroyatnostnye kharakteristiki algoritma prostranstvenno-vremennogo poiska impul'snogo izlucheniya s odnokanal'noi obrabotkoi informatsii. XXI vek: Itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus'. *Seriya «Tekhnicheskie nauki. Informatsionnye tekhnologii»: Nauchno-metodicheskii zhurnal*. [Probabilistic characteristics of the spatio-temporal search algorithm for pulsed radiation with single-channel information processing. XXI century: Results of the past and problems of the present plus. Series "Engineering. Information Technologies": Scientific and Methodological Journal]. №3 (20). 208 p. Pp. 70-77.