

Измерение вероятности стирания двоичного символа «0» в однофотонном асинхронном канале связи с приёмником на основе счётчика фотонов

А.М. Тимофеев

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 28.04.2021

Принята к печати 11.06.2021

При измерении маломощных оптических сигналов приёмные модули каналов однофотонной связи должны обеспечивать наименьшие потери передаваемой информации. В этой связи целесообразно использовать счётчики фотонов, которые являются высокочувствительными, однако характеризуются ошибками регистрации данных. Поэтому цель работы – исследовать влияние интенсивности регистрируемого оптического излучения при передаче двоичных символов «0» на вероятность стирания этих символов в канале однофотонной связи, содержащем в качестве приёмного модуля счётчик фотонов на базе лавинного фотоприёмника с включением по схеме пассивного гашения лавины.

На основе методики уменьшения потерь информации определены нижний и верхний пороговые уровни зарегистрированных на выходе счётчика фотонов импульсов, а также статистические распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при регистрации двоичных символов «0» $P_{st0}(N)$ и двоичных символов «1» $P_{st1}(N)$, при которых вероятность стирания двоичных символов «0» $P(-/0)$ минимальная.

Экспериментальные результаты показали, что для достижения минимальной вероятности стирания двоичных символов «0» $P(-/0) = 0,11 \cdot 10^{-2}$ важно подбирать не только интенсивность используемого оптического излучения J_0 , но и напряжение питания лавинного фотоприёмника $U_{пит}$, при которых мёртвое время счётчика фотонов минимально, а его квантовая эффективность регистрации максимальна: $J_0 \geq 98,94 \cdot 10^{-2}$ отн. ед. и $U_{пит} = 52,54$ В.

Ключевые слова: счётчик фотонов, канал однофотонной связи, вероятность ошибочной регистрации двоичных символов.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-156-165

Адрес для переписки:

Тимофеев А.М.
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: tamvks@mail.ru

Address for correspondence:

Timofeev A.M.
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Brovka str., 6, Minsk 220013, Belarus
e-mail: tamvks@mail.ru

Для цитирования:

А.М. Тимофеев.
Измерение вероятности стирания двоичного символа «0» в однофотонном асинхронном канале связи с приёмником на основе счётчика фотонов.
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 156–165.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-156-165

For citation:

A.M. Timofeev.
[Measurement of the Probability of a Binary Symbol «0» Erasing in a Single-Photon Asynchronous Communication Channel with a Receiver Based on a Photon Counter].
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 156–165 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-156-165

Measurement of the Probability of a Binary Symbol «0» Erasing in a Single-Photon Asynchronous Communication Channel with a Receiver Based on a Photon Counter

A.M. Timofeev

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Brovka str., 6, Minsk 220013, Belarus

Received 28.04.2021

Accepted for publication 11.06.2021

Abstract

Receiving modules of single-photon communication channels should provide the least loss of transmitted information when measuring low-power optical signals. In this regard, it is advisable to use photon counters. They are highly sensitive, but are characterized by data logging errors. Therefore, the purpose of this work was to investigate the effect of the intensity of the recorded optical radiation during the transmission of binary symbols «0» on the probability of erasing these symbols in a single-photon communication channel containing a photon counter based on an avalanche photodetector as a receiving module with a passive avalanche suppression scheme.

The lower and upper threshold levels of pulses recorded at the output of the photon counter, as well as the statistical distributions of the mixture of the number of dark and signal pulses at the output of the photon counter when registering binary symbols «0» $P_{st0}(N)$ and «1» $P_{st1}(N)$ were determined. For this, a technique was used to reduce information loss. As a result, the minimum probability of erasing binary symbols «0» $P(-/0)$ was achieved.

The performed experimental results showed that to achieve the minimum probability of erasing binary symbols «0» $P(-/0) = 0,11 \cdot 10^{-2}$, it is important to select not only the intensity of the used optical radiation J_0 , but also the supply voltage of the avalanche photodetector U , at which the dead time of the photon counter is minimal, and its quantum detection efficiency is maximum: $J_0 \geq 98,94 \cdot 10^{-2}$ rel. units and $U = 52,54$ V.

Keywords: photon counter, single-photon communication channel, probability of erroneous registration of binary symbols.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-156-165

Адрес для переписки:

Тимофеев А.М.
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: tamvks@mail.ru

Address for correspondence:

Timofeev A.M.
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Brovka str., 6, Minsk 220013, Belarus
e-mail: tamvks@mail.ru

Для цитирования:

А.М. Тимофеев.
Измерение вероятности стирания двоичного символа «0» в однофотонном асинхронном канале связи с приёмником на основе счётчика фотонов.
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 156–165.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-156-165

For citation:

A.M. Timofeev.
[Measurement of the Probability of a Binary Symbol «0» Erasing in a Single-Photon Asynchronous Communication Channel with a Receiver Based on a Photon Counter].
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 156–165 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-156-165

Введение

При построении современных систем связи важно обеспечивать достаточно высокую надёжность используемых для этого технических средств [1, 2]. Это становится критически важным в случаях, когда при передаче и приёме информации требуется решить определённые задачи в сфере информационной безопасности (например, гарантировать конфиденциальность передаваемых данных, их целостность и пр.). Решение таких задач носит, как правило, комплексный характер и может быть достигнуто за счёт использования каналов однофотонной связи [3–10].

Отметим, что в каналах однофотонной связи каждый двоичный бит (символ) передаётся посредством предельно слабого оптического излучения со средним числом фотонов не более нескольких десятков. Использование столь слабого оптического излучения позволяет обеспечить абсолютную скрытность и конфиденциальность передаваемой информации за счёт применения квантово-механического ресурса при кодировании передаваемых данных. При этом регистрация оптического излучения в каналах однофотонной связи возможна посредством высокочувствительных приёмных модулей, таких, как счётчики фотонов [4–16]. Однако счётчики фотонов ввиду неидеальности своих характеристик могут приводить к ошибкам при передаче информации, в результате чего уровень информационной безопасности системы связи может быть уменьшен, а также снижена её пропускная способность [17]. Причиной таких ошибок является, в частности, мёртвое время счётчика фотонов, которое приводит к так называемым «просчётам».

Мёртвое время счётчика фотонов – это время, в течение которого счётчик фотонов не чувствителен к падающему на него оптическому излучению [7, 8].

Одним из критериев оценки надёжности канала однофотонной связи, содержащего в качестве приёмного модуля счётчик фотонов, является вероятность ошибочной регистрации данных [4, 5]. Исследования, выполненные в работах [17, 18], показали, что применительно к каналам однофотонной связи вероятность ошибочной регистрации данных определяется двумя составляющими: вероятностью стирания двоичного символа, а также вероятностью регистрации разноименных символов.

Вероятность стирания двоичного символа – это вероятность того, что при передаче двоичного символа («0» или «1») на выходе канала связи не будет зарегистрирован ни символ «0», ни символ «1» [17–20].

В случае передачи двоичного символа «0» под вероятностью регистрации разноименных символов будем понимать вероятность регистрации на выходе канала связи символа «1» при наличии символа «0» на входе канала связи $P(1/0)$, а в случае передачи двоичного символа «1» – вероятность регистрации на выходе канала связи символа «0» при наличии символа «1» на входе канала связи $P(0/1)$ [17–20].

Вероятность стирания двоичного символа может иметь место как при передаче двоичного символа «0», так и при передаче двоичного символа «1», и зависит от интенсивности регистрируемого оптического излучения. Однако в литературных источниках отсутствует оценка влияния интенсивности регистрируемого оптического излучения при передаче информации в канале однофотонной связи, содержащем в качестве приёмного модуля счётчик фотонов, на вероятность стирания двоичного символа.

Объектом исследования являлся асинхронный двоичный несимметричный однородный волоконно-оптический канал связи без памяти и со стиранием, содержащий в качестве приёмного модуля счётчик фотонов на базе лавинного фотоприёмника ФД-115Л, включённый по схеме пассивного гашения лавины. Выбор в качестве объекта исследования такого канала связи обусловлен тем, что волоконно-оптический канал характеризуется наибольшей пропускной способностью по сравнению с другими средами передачи данных, например, металлическими проводами, открытым пространством и пр. Асинхронный способ передачи и приёма информации не требует наличия дополнительных линий связи для передачи и приёма синхроимпульсов [17–20]. Схема пассивного гашения имеет меньшую погрешность измерений регистрируемого излучения благодаря отсутствию принудительного гашения лавинного пробоя, что выгодно её отличает от других схем – активного гашения и импульсного смещения p - n -перехода (со стробированием). Фотоприёмники ФД-115Л используются для работы в ближнем ИК-диапазоне и за счёт применяемого при их изготовлении кремниевого полупроводникового материала характеризуются меньшими шумами, связанными с умножением носителей, и лучшей

пороговой чувствительностью по сравнению с германиевыми и галлиевыми фотоприёмниками. Также следует отметить, что кремниевые лавинные фотоприёмники позволяют реализовывать режим счёта фотонов при комнатных температурах [8, 21–27].

Предметом исследования являлось установление влияния таких параметров лавинного фотоприёмника, как интенсивность регистрируемого оптического излучения и напряжение питания, на вероятность стирания двоичных данных в канале однофотонной связи.

Целью данной работы являлось исследование влияния интенсивности регистрируемого оптического излучения при передаче двоичных символов «0» на вероятность стирания этих символов в канале однофотонной связи, содержащем в качестве приёмного модуля счётчик фотонов на базе лавинного фотоприёмника с включением по схеме пассивного гашения лавины.

Выражение для оценки вероятности стирания двоичных символов «0»

Дальнейшие рассуждения будут основаны на том, что передача информации осуществляется по однофотонному каналу связи двоичными символами («0» и «1») в течение длительности времени τ_b . Причём при передаче символов «0» и «1» используются оптические сигналы мощностью W_1 и W_2 соответственно ($W_1 < W_2$), которые содержат от одного до нескольких десятков фотонов и транслируются в канал связи в течение времени однофотонной передачи $\Delta t = \tau_b / 2$, а приём – с помощью счётчика фотонов, выполненного на базе лавинного фотоприёмника, включённого по схеме пассивного гашения лавины [8]. Следовательно, в течение времени $t_3 = \tau_b / 2$ данные в канал связи не передаются, т. е. между каждой парой символов находится так называемый «защитный» временной интервал. Поскольку символы «0» и «1» передаются импульсами различной мощности, то на выходе счётчика фотонов за время Δt формируется различное количество электрических импульсов, которое будет прямо пропорционально мощности оптического излучения. Всеми потерями информации, за исключением потерь в счётчике фотонов, пренебрегаем.

Вероятность стирания двоичных символов «0» для рассматриваемого канала связи равна [18]:

$$P(-/0) = \sum_{N=0}^{N_1-1} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} = \sum_{N=0}^{N_1-1} P_{st0}(N), \quad (1)$$

где N_1 – нижний пороговый уровень регистрации; n_t – средняя скорость счёта темновых импульсов на выходе счётчика фотонов; n_{s0} – средняя скорость счёта сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при передаче символов «0»; Δt – среднее время однофотонной передачи; τ_d – средняя длительность мёртвого времени продлевающегося типа; $P_{st0}(N)$ – статистическое распределение смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при регистрации двоичных символов «0».

Нижний пороговый уровень регистрации – это наименьшее число зарегистрированных на выходе счётчика фотонов импульсов, при котором делается вывод, что передан символ «0».

При регистрации импульсов в количестве, меньшем N_1 , принимается решение, что символ отсутствует [17, 18].

Темновые и сигнальные – это импульсы, которые появляются на выходе счётчика фотонов соответственно в отсутствии оптического сигнала и в результате воздействия фотонов регистрируемого излучения [8].

Скорость счёта темновых импульсов определяется как число импульсов, формирующихся на выходе приёмного модуля в единицу времени, когда регистрируемое оптическое излучение отсутствует [7, 8]. Скорость счёта сигнальных импульсов определяется как число импульсов, формирующихся на выходе приёмного модуля в единицу времени при воздействии фотонов излучения. Для оценки скоростей счёта темновых и сигнальных импульсов используют их средние значения n_t и n_{s0} соответственно [7, 8].

Важно также отметить, что поскольку счётчик фотонов построен на базе лавинного фотоприёмника с включением по схеме пассивного гашения лавины, он характеризуется мёртвым временем продлевающегося типа [8]. Длительность мёртвого времени продлевающегося типа зависит от интенсивности оптического излучения, поэтому для оценки этого времени используют его среднее значение [8]. Учитывая то, что регистрирующая аппаратура, входящая в состав счётчика фотонов, как правило, имеет мёртвое время, много меньшее, чем мёртвое время

лавинного фотоприёмника [8], длительностью мёртвого времени регистрирующей аппаратуры пренебрегаем и при дальнейших рассуждениях его рассматривать не будем.

Описание методики проведения экспериментальных исследований

Статистические распределения, входящие в выражение (1), могут быть получены с использованием установки, структурная схема которой представлена и описана в [28], поэтому в данной работе она не приведена. Расчёт нижнего порогового уровня регистрации N_1 выполнялся в соответствии с методикой [28] с выбором в качестве критерия для её реализации минимального значения:

$$K_P = \frac{1 - \sum_{N=N_1}^{N_2} P_{st0}(N) + \sum_{N=0}^{N_2} P_{st1}(N)}{1 + \sum_{N=N_1}^{N_2} P_{st0}(N) - \sum_{N=0}^{N_2} P_{st1}(N)}, \quad (2)$$

где N_2 – верхний пороговый уровень регистрации; $P_{st1}(N)$ – статистическое распределение смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при регистрации двоичных символов «1».

Верхний пороговый уровень регистрации – это наибольшее число зарегистрированных на выходе счётчика фотонов импульсов, при котором делается вывод, что передан символ «0». При превышении зарегистрированных импульсов числа N_2 делается вывод, что передан символ «1» [28].

При реализации методики уменьшения потерь информации [28] начальное значение критерия K_P выбиралось равным 10^3 , которое устанавливалось на первом этапе формирования массивов данных статистических распределений смеси числа темновых и сигнальных импульсов $P_{st}(N)$ и интенсивностей оптических сигналов J , а также на третьем этапе определения интенсивности оптического сигнала для передачи двоичных символов «1». Отметим, что при выполнении методики [28] также допускается использовать в качестве критерия наибольшее значение K_P^{-1} , однако в этом случае на первом и третьем её этапах в качестве начального значения критерия K_P необходимо устанавливать значение 10^{-3} .

Таким образом, входными параметрами являлись [28]:

$$P_{st}(N) = \{P_{st}(N)^{(1)}, P_{st}(N)^{(2)}, P_{st}(N)^{(i)}, \dots, P_{st}(N)^{(m)}\}; \quad (3)$$

$$J = \{J^{(1)}, J^{(2)}, J^{(i)}, \dots, J^{(m)}\}, \quad (4)$$

где $P_{st}(N)^{(i)}$ – i -ое статистическое распределение смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов, соответствующее i -ой интенсивности оптического сигнала $J^{(i)}$, $i = 2 \div m$ (m определяется объёмом накопленных данных числа импульсов).

Выходными параметрами являлись пороговые уровни зарегистрированных импульсов N_1 и N_2 и статистические распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при регистрации двоичных символов «0» $P_{st0}(N)$ и двоичных символов «1» $P_{st1}(N)$. Также выходными параметрами являлись интенсивности регистрируемых оптических излучений при передаче двоичных символов «0» J_0 и двоичных символов «1» J_1 , соответствующие $P_{st}(N)^{(i'_0)}$, $J^{(i'_0)}$ и $P_{st}(N)^{(i'_1)}$, $J^{(i'_1)}$, которые выбирались из массивов данных (3) и (4) в порядке, предусмотренном методикой уменьшения потерь информации [28]. Рассчитать вероятность стирания двоичных символов «0» можно путём подстановки в формулу (1) статистических распределений $P_{st0}(N)$ при выбранном значении N_1 .

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Выполнены исследования зависимости вероятности стирания двоичных символов «0» от интенсивности оптического сигнала, используемого для передачи этих символов, проиллюстрированные на рисунке 1.

Нижний и верхний пороговые уровни зарегистрированных на выходе счётчика фотонов импульсов, а также статистические распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при регистрации двоичных символов «0» $P_{st0}(N)$ определялись по методике, описанной выше. Расчёт вероятности стирания двоичных символов «0» $P(-/0)$ выполнен путём подстановки статистических распределений $P_{st0}(N)$ и нижнего порогового уровня зарегистрированных на выходе счётчика фотонов импульсов N_1 в формулу (1). Измерения проводились при различных значениях напряжения питания лавинного фотоприёмника

с использованием установки [28]. Отметим, что для реализации режима счёта фотонов напряжения питания лавинного фотоприёмника выбирались вблизи напряжения его лавинного пробоя, которое определялось по методике [8] и составляло 52,71 В. Интенсивности оптических излучений J_0 , используемых для передачи двоичных символов «0», нормированы на максимальное значение из исследуемого диапазона. Все исследования проводились при температуре 293 К.

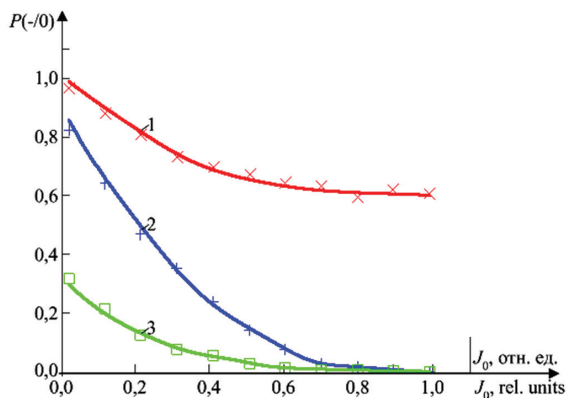


Рисунок 1 – Зависимость вероятности стирания двоичных символов «0» от интенсивности оптического сигнала, используемой для передачи этих символов; напряжение питания лавинного фотоприёмника ФД-115Л: 1 – $\times U_{\text{пит}} = 52,48$ В; 2 – $+ U_{\text{пит}} = 52,54$ В; 3 – $- U_{\text{пит}} = 52,65$ В

Figure 1 – Dependence of the probability of erasure of binary symbols «0» on the intensity of the optical signal used to transmit these symbols; supply voltage of the FD-115L avalanche photodetector: 1 – $\times U = 52.48$ V; 2 – $+ U = 52.54$ V; 3 – $- U = 52.65$ V

Из результатов, представленных на рисунке 1, видно, что каждая из зависимостей $P(-/0)$ от J_0 имеет схожие тенденции изменения для всех исследуемых напряжений питания лавинного фотоприёмника. С увеличением интенсивности оптического сигнала J_0 зависимости $P(-/0)$ от J_0 спадают вплоть до своего наименьшего значения, после чего практически не меняются. Это весьма хорошо согласуется с результатами математического моделирования рассматриваемого канала связи, полученными в работе [18] при исследовании зависимостей $P_{\text{out}}(n_{s0})$, и объясняется следующим.

При небольших значениях интенсивностей оптического сигнала J_0 средняя скорость счёта сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при передаче символов «0» n_{s0} не велика.

Следовательно, вероятность регистрации на выходе счётчика фотонов импульсов в количестве, равном нижнему пороговому уровню регистрации N_1 или большем, чем N_1 , также мала. В результате вероятность стирания двоичных символов «0» $P(-/0)$ весьма высока (см. рисунок 1).

С увеличением интенсивности оптического сигнала J_0 средняя скорость счёта сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при передаче символов «0» растёт. Это приводит к увеличению вероятности регистрации на выходе счётчика фотонов импульсов, равном или большем N_1 , поэтому зависимости $P(-/0)$ от J_0 спадают вплоть до своего наименьшего значения.

Важно отметить, что при прочих равных параметрах приёма вероятность стирания двоичных символов «0», соответствующая наименьшей из исследуемого диапазона интенсивности оптического сигнала $J_0 = 1,79 \cdot 10^{-2}$ отн. ед., уменьшается с увеличением напряжения питания лавинного фотоприёмника и равна: $98,85 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,48$ В; $85,67 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,54$ В; $29,83 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,65$ В.

Объясняется это ростом средней скорости счёта темновых импульсов на выходе счётчика фотонов n_t при увеличении напряжения питания лавинного фотоприёмника. Такой рост способствует увеличению средней скорости счёта смеси темновых и сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при передаче символов «0» n_{st0} , равной $(n_t + n_{s0})$. В этом случае максимум статистического распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов $P_{st0}(N)$ при передаче символов «0» смещается в сторону больших значений N при одинаковой интенсивности J_0 , но более высоком напряжении питания лавинного фотоприёмника [18].

Отметим, что указанные особенности изменения статистических распределений $P_{st0}(N)$, проявляющиеся с ростом напряжения питания лавинного фотоприёмника, полученные по результатам выполненных экспериментальных исследований, имели схожий вид с теоретическими распределениями [18], поэтому в данной работе распределения $P_{st0}(N)$ не приведены.

В результате при прочих равных параметрах приёма с ростом напряжения питания лавинного фотоприёмника $U_{\text{пит}}$ вероятность стирания двоичных символов «0» $P(-/0)$ уменьшается.

Причём это наблюдается во всём диапазоне интенсивности оптического сигнала, на кото-

ром зависимости $P(-/0)$ от J_0 спадают вплоть до своего наименьшего значения (см. рисунок 1). Так, например, при интенсивности оптического сигнала $J_0 = 30,94 \cdot 10^{-2}$ отн. ед. вероятность стирания двоичных символов «0» равна: $74,19 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,48$ В; $34,46 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,54$ В; $8,26 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,65$ В.

Установлено, что при прочих равных параметрах приёма с увеличением напряжения питания лавинного фотоприёмника минимальная вероятность стирания двоичных символов «0» $P(-/0)$, полученная в исследуемом диапазоне интенсивности оптического сигнала, уменьшается, однако затем растёт: $60,01 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,48$ В; $0,11 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,54$ В; $0,21 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,65$ В.

Это обусловлено тем, что при увеличении напряжения питания лавинного фотоприёмника мёртвое время счётчика фотонов уменьшается, переходя в насыщение, а квантовая эффективность регистрации вначале растёт и после достижения максимальной величины уменьшается [8].

По этим же причинам наименьшая интенсивность оптического сигнала J_0 , при достижении которой зависимости $P(-/0)$ от J_0 переходят в насыщение, с ростом $U_{\text{пит}}$ при прочих равных параметрах приёма также вначале увеличивается, однако затем снижается. Так, например, насыщение зависимостей $P(-/0)$ от J_0 , которое определялось по 5%-ному отклонению вероятности $P(-/0)$ от её минимального значения для соответствующего напряжения питания лавинного фотоприёмника, наблюдалось при $J_0 \geq 60,56 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,48$ В; при $J_0 \geq 98,94 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,54$ В; при $J_0 \geq 98,74 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,65$ В.

Заключение

Применительно к асинхронному двоичному несимметричному однородному волоконно-оптическому каналу связи без памяти и со стиранием, содержащему в качестве приёмного модуля счётчик фотонов на базе лавинного фотоприёмника ФД-115Л с включением по схеме пассивного гашения лавины, выполнена оценка влияния интенсивности оптического сигнала J_0 , используемого для передачи двоичных символов «0», на вероятность стирания этих символов $P(-/0)$.

На основе методики уменьшения потерь информации определены нижний N_1 и верх-

ний N_2 пороговые уровни зарегистрированных на выходе счётчика фотонов импульсов, а также статистические распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при регистрации двоичных символов «0» $P_{st0}(N)$, при которых вероятность стирания этих символов $P(-/0)$ минимальная.

Выполненные экспериментальные результаты показали, что для уменьшения вероятности стирания двоичных символов «0» $P(-/0)$ важно подбирать не только интенсивность используемого оптического излучения J_0 , но и напряжение питания лавинного фотоприёмника $U_{\text{пит}}$. Это позволяет достичь минимальных потерь информации в исследованном канале связи.

Установлено, что с увеличением интенсивности оптического сигнала J_0 зависимости $P(-/0)$ от J_0 спадают и, достигая своего наименьшего значения, переходят в насыщение. Спад зависимости $P(-/0)$ от J_0 происходит в диапазоне интенсивности оптического сигнала J_0 , на котором с ростом J_0 средняя скорость счёта сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при передаче символов «0» n_{s0} увеличивается. Определено, что в таком диапазоне интенсивностей оптического сигнала J_0 вероятность стирания двоичных символов «0» $P(-/0)$ уменьшается с ростом $U_{\text{пит}}$ при прочих равных параметрах приёма.

Получено, что минимальная вероятность ошибочной регистрации двоичных символов «0» для исследованного канала связи равна $0,11 \cdot 10^{-2}$ и соответствует $J_0 \geq 98,94 \cdot 10^{-2}$ отн. ед. и $U_{\text{пит}} = 52,54$ В, при которых мёртвое время счётчика фотонов минимально, а его квантовая эффективность регистрации максимальна.

Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы при создании систем квантово-криптографической асинхронной связи, содержащих в качестве приёмных модулей счётчики фотонов с мёртвым временем продлевающегося типа и характеризующихся низкой вероятностью ошибок легитимного приёмного оборудования.

Автору настоящей работы представляются весьма актуальными исследования, направленные на обоснование выбора лавинного фотоприёмника, используемого при построении счётчика фотонов. Такие фотоприёмники могут отличаться как по структуре полупроводниковых областей, так и по площади фоточувствительной поверхности. В этой связи в ходе дальнейших комплексных исследований планируется опре-

делить, как эти параметры влияют на вероятность ошибочной регистрации двоичных данных применительно к асинхронному двоичному несимметричному однородному однофотонному каналу связи без памяти и со стиранием.

Список использованных источников

1. *Дмитриев С.А.* Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / С.А. Дмитриев, Н.Н. Слепов. – 3-е изд. – М.: Техносфера, 2010. – 608 с.

2. *Щеглов А.Ю.* Анализ и проектирование защиты информационных систем. Контроль доступа к компьютерным ресурсам: методы, модели, технические решения / А.Ю. Щеглов. – СПб.: Профессиональная литература, 2017. – 416 с.

3. *Vacca J.R.* Managing Information Security. – 2nd Edition / J.R. Vacca. – Elsevier Inc: Waltham, 2014. – 372 p. DOI: 10.1016/C2011-0-08782-3

4. *Тимофеев А.М.* Влияние времени однофотонной передачи информации на вероятность ошибочной регистрации данных асинхронных квантово-криптографических каналов связи / А.М. Тимофеев // Вестник ТГТУ. – 2019. – Т. 25. – № 1. – С. 36–46. DOI: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.036-046

5. *Yiannopoulos K., Sagias N.C., Boucouvalas A.C.* On the photon counting error probability and its application in optical wireless communications. Physical Communication. – 2019. – Vol. 36. – Pp. 100756–100764. DOI: 10.1016/j.phycom.2019.100756

6. *Тимофеев А.М.* Влияние времени однофотонной передачи информации на достоверность ее приема в квантово-криптографическом канале связи / А.М. Тимофеев // Системный анализ и прикладная информатика. – 2019. – № 1. – С. 67–72. DOI: 10.21122/2309-4923-2019-1-67-72

7. *Килин С.Я.* Квантовая криптография: идеи и практика / С.Я. Килин; под ред. С.Я. Килин, Д.Б. Хорошко, А.П. Низовцев. – Минск: Белорусская наука, 2007. – 391 с.

8. *Гулаков И.Р.* Фотоприемники квантовых систем: монография / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 276 с.

9. *Калачев А.А.* Элементная база дальнедействующей квантовой связи. Часть 1 / А.А. Калачев // Фотоника. – 2017. – № 1. – С. 88–98. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.61.1.88.98

10. *Калачев А.А.* Элементная база дальнедействующей квантовой связи. Часть 2 / А.А. Калачев // Фотоника. – 2017. – № 2. – С. 80–88. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.62.2.80.88

11. *Cova S.D., Ghioni M.* Single-photon counting detectors. IEEE Photonics Journal. – 2011. – Vol. 3, no. 2. –

Pp. 274–277. DOI: 10.1109/JPHOT.2011.2130518

12. *Hu S.* 35.88 attenuation lengths and 3.32 bits/photon underwater optical wireless communication based on photon-counting receiver with 256-PPM / S. Hu [et al.] // Optics Express. – 2018. – Vol. 26, no. 17. – Pp. 21685–21699. DOI: 10.1364/OE.26.021685

13. *Bourennane M.* Single-photon counters in the telecom wavelength region of 1550 nm for quantum information processing / M. Bourennane [et al.] // Journal of Modern Optics. – 2001. – Vol. 48, no. 13. – Pp. 1983–1995. DOI: 10.1080/09500340110075131

14. *Hong Z.* Photon-counting underwater optical wireless communication for reliable video transmission using joint source-channel coding based on distributed compressive sensing / Z. Hong [et al.] // Sensors. – 2019. – Vol. 19, no. 5. – Pp. 1042–1054. DOI: 10.3390/s19051042

15. *Zadeh I.E.* Single-photon detectors combining high efficiency, high detection rates, and ultra-high timing resolution / I.E. Zadeh [et al.] // APL Photonics. – 2017. – Vol. 2. – Pp. 111301-1–111301-7. DOI: 10.1063/1.5000001

16. *Zhang J.* Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication / J. Zhang [et al.] // Light: Science & Applications. – 2015. – Vol. 4. – Pp. 1–13. DOI: 10.1038/lsa.2015.59

17. *Тимофеев А.М.* Скорость передачи информации однофотонного канала связи с приемным модулем на основе счетчика фотонов с мертвым временем продлевающегося типа / А.М. Тимофеев // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. – 2019. – № 2. – С. 79–86.

18. *Тимофеев А.М.* Оценка влияния продлевающегося мертвого времени счетчика фотонов на вероятность ошибочной регистрации данных квантово-криптографических каналов связи / А.М. Тимофеев // Вестник связи. – 2018. – № 1. – С. 56–62.

19. *Клюев Л.Л.* Теория электрической связи: учебник / Л.Л. Клюев. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 423 с.

20. *Биккенин Р.Р.* Теория электрической связи / Р.Р. Биккенин, М.Н. Чесноков. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 336 с.

21. *Privitera S.* Single photon avalanche diodes: towards the large bidimensional arrays / S. Privitera [et al.] // Sensors. – 2008. – Vol. 8. – Pp. 4636–4655. DOI: 10.3390/s8084636

22. *Campajola M.* Proton induced dark count rate degradation in 150-nm CMOS single-photon avalanche diodes / M. Campajola [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2019. – Vol. 947. – Pp. 162722–162728. DOI: 10.1016/j.nima.2019.162722

23. Stipčević M. Characterization of a novel avalanche photodiode for single photon detection in VIS-NIR range / M. Stipčević [et al.] // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18. – Pp. 17448–17459.

DOI: 10.1364/OE.18.017448

24. Nuriyev S. Performance of a new generation of micropixel avalanche photodiodes with high pixel density and high photon detection efficiency / S. Nuriyev [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2018. – Vol. 912. – Pp. 320–322.

DOI: 10.1016/j.nima.2017.12.006

25. Stucki D. Photon counting for quantum key distribution with Peltier cooled InGaAs/InP APDs / D. Stucki [et al.] // *Journal of Modern Optics*. – 2001. – Vol. 48, no. 13. – Pp. 1967–1981.

DOI: 10.1080/09500340108240900

26. Castelletto S.A. Reduced deadtime and higher rate photon-counting detection using a multiplexed detector array / S.A. Castelletto [et al.] // *Journal of Modern Optics* – 2007. – Vol. 54. – Pp. 337–352.

DOI: 10.1080/09500340600779579

27. Prochazka I. Single photon detector package with sub-picosecond limiting precision and stability / I. Prochazka, J. Blazej, J. Kodet // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2018. – Vol. 912. – Pp. 213–216.

DOI: 10.1016/j.nima.2017.11.044

28. Тимофеев А.М. Оценка влияния интенсивности оптического сигнала на вероятность ошибочной регистрации данных в однофотонном канале связи / А.М. Тимофеев // *Информатика*. – 2021. – Т. 18. – № 2. – С. 84–94.

DOI: 10.37661/1816-0301-2021-18-2-84-94

References

1. Dmitriev S.A., Slepov N.N. *Volokonno-opticheskaya tehnika: sovremennoe sostoyanie i novyye perspektivy* [Fiber optic technology: current state and new perspectives]. – 3rd ed. – Moscow, Technosphere Publ., 2010, 608 p.

2. Scheglov A.Yu. *Analiz i proektirovanie zaschityi informatsionnykh sistem. Kontrol dostupa k kompyuternym resursam: metodyi, modeli, tehnicheckie resheniya* [Analysis and design of information systems protection. Control of access to computer resources: methods, models, technical solutions]. St. Petersburg, Professional literature, 2017, 416 p.

3. Vacca J.R. *Managing Information Security*. – 2nd Edition. – Elsevier Inc, Waltham, 2014, 372 p.

DOI: 10.1016/C2011-0-08782-3

4. Timofeev A.M. [The effect of single photon transmission time on the probability of erroneous registration of asynchronous data of quantum cryptographic communication channels]. *Vestnik TGTU* [Transactions TSTU], 2019, vol. 25, no. 1, pp. 36–46 (in Russian). **DOI:** 10.17277/vestnik.2019.01.pp.036-046

5. Yiannopoulos K., Sagias N.C., Boucouvalas A.C. On the photon counting error probability and its application in optical wireless communications. *Physical Communication*, 2019, vol. 36, pp. 100756–100764.

DOI: 10.1016/j.phycom.2019.100756

6. Timofeev A.M. [The influence of the time of single photon transmission of information on the reliability of its reception in a quantum cryptographic communication channel]. *Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika* [System analysis and applied information science], 2019, no. 1, pp. 67–72 (in Russian).

DOI: 10.21122/2309-4923-2019-1-67-72

7. Kilin S.Ya. *Kvantovaya kriptografiya: idei i praktika* [Quantum cryptography: ideas and practices]. Minsk, Belarus. Sci Publ., 2007, 391 p.

8. Gulakov I.R., Zenevich A.O. *Fotopriemniki kvantovykh sistem: monografiya* [Photodetectors of quantum systems: monograph]. Minsk, EI HSCC, 2012, 276 p.

9. Kalachev A.A. [Components of long-distance quantum communication. Part 1]. *Fotonika* [Photonics], 2017, no. 1, pp. 88–98 (in Russian).

DOI: 10.22184/1993-7296.2017.61.1.88.98

10. Kalachev A.A. [Components of long-distance quantum communication. Part 1]. *Fotonika* [Photonics], 2017, no. 2, pp. 80–88 (in Russian).

DOI: 10.22184/1993-7296.2017.62.2.80.88

11. Cova S.D., Ghioni M. Single-photon counting detectors. *IEEE Photonics Journal*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 274–277. **DOI:** 10.1109/JPHOT.2011.2130518

12. Hu S., Mi L., Zhou T., Chen W. 35.88 attenuation lengths and 3.32 bits/photon underwater optical wireless communication based on photon-counting receiver with 256-PPM. *Optics Express*, 2019, vol. 26, no. 17, pp. 21685–21699. **DOI:** 10.1364/OE.26.021685

13. Bourennane M., Karlsson A., Pena J.C., Mathés M. Single-photon counters in the telecom wavelength region of 1550 nm for quantum information processing. *Journal of Modern Optics*, 2001, vol. 48, no. 13, pp. 1983–1995. **DOI:** 10.1080/09500340110075131

14. Hong Z., Yan Q., Li Z., Zhan T., Wang Y. Photon-counting underwater optical wireless communication for reliable video transmission using joint source-channel coding based on distributed compressive sensing. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 1042–1054.

DOI: 10.3390/s19051042

15. Zadeh I.E., Los J.W.N., Gourgues R.B.M., Steinmetz V., Bulgarini G., Dobrovolskiy S.M., Zwiller V.,

- Dorenbos S.N. Single-photon detectors combining high efficiency, high detection rates, and ultra-high timing resolution. *APL Photonics*, 2017, vol. 2, pp. 111301-1–111301-7. DOI: 10.1063/1.5000001
16. Zhang J., Itzler M.A., Zbinden H., Pan J.-W. Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication. *Light: Science & Applications*, 2015, vol. 4, pp. 1–13. DOI: 10.1038/lsa.2015.59
17. Timofeev A.M. [Information transfer rate of a single photon communication channel with a receiver module based on a photon counter with a dead time of a prolonged type]. *Trudyi BGTU. Ser. 3, Fiziko-matematicheskie nauki i informatika* [Proceedings of BSTU. Issue 3. Physics and mathematics. Informatics], 2019, no. 2, pp. 79–86 (in Russian).
18. Timofeev A.M. [Estimation of the photons counter lasting dead time influence on the probability of erroneous data registration of quantum-cryptographic communication channels]. *Vestnik svyazi* [Communication bulletin], 2018, no. 1, pp. 56–62 (in Russian).
19. Klyuev L.L. *Teoriya elektricheskoy svyazi: uchebnyk* [The theory of electrical communication: textbook]. Minsk: Techn.Perspect. Publ., 2008, 423 p.
20. Bikkenin R.R., Chesnokov M.N. *Teoriya elektricheskoy svyazi* [The theory of electrical communication]. Moscow, Publ. Cent «Academy», 2010, 336 p.
21. Privitera S., Tudisco S., Lanzano L., Musumeci F., Pluchino A., Scordino A., Campisi A., Cosentino L., Finocchiaro P., Condorelli G., Mazzillo M., Lombardo S., Sciacca E. Single photon avalanche diodes: towards the large bidimensional arrays. *Sensors*, 2008, vol. 8, pp. 4636–4655. DOI: 10.3390/s8084636
22. Campajola M., Capua F.D., Fiore D., Sarnelli E., Aloisio A. Proton induced dark count rate degradation in 150-nm CMOS single-photon avalanche diodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, vol. 947, pp. 162722–162728. DOI: 10.1016/j.nima.2019.162722
23. Stipčević M., Skenderović H., Gracin D. Characterization of a novel avalanche photodiode for single photon detection in VIS-NIR range. *Optics Express*, 2010, vol. 18, pp. 17448–17459. DOI: 10.1364/OE.18.017448
24. Nuriyev S., Ahmadov F., Sadygov Z., Akberov R., Ahmadov G., Abbasov . Performance of a new generation of micropixel avalanche photodiodes with high pixel density and high photon detection efficiency. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, vol. 912, pp. 320–322. DOI: 10.1016/j.nima.2017.12.006
25. Stucki D., Ribordy G., Stefanov A., Zbinden H., Rarity J.G., Wall T. Photon counting for quantum key distribution with Peltier cooled InGaAs/InP APDs. *Journal of Modern Optics*, 2001, vol. 48, no. 13, pp. 1967–1981. DOI: 10.1080/09500340108240900
26. Castelletto S.A., Degiovanni I.P., Schettini V., Migdall A.L. Reduced deadtime and higher rate photon-counting detection using a multiplexed detector array. *Journal of Modern Optics*, 2007, vol. 54, pp. 337–352. DOI: 10.1080/09500340600779579
27. Prochazka I., Blazej J., Kodet J. Single photon detector package with sub-picosecond limiting precision and stability. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, vol. 912, pp. 213–216. DOI: 10.1016/j.nima.2017.11.044
28. Timofeev A.M. [Assessment of the influence of the intensity of the optical signal on the probability of erroneous data registration in a single-photon communication channel]. *Informatika* [Informatics], 2021, vol. 18, no. 2, pp. 84–94 (in Russian). DOI: 10.37661/1816-0301-2021-18-2-84-94