

УДК 621.383.92

## Исследование продлевающегося мертвого времени одnofотонного канала связи с кодированием передаваемой информации длительностью оптического импульса

Тимофеев Александр Михайлович<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защиты информации, tamvks@mail.ru

### Аннотация

Применительно к двоичному однофотонному каналу связи с кодированием передаваемой информации длительностью оптического импульса и содержащем в качестве приемного модуля счетчик фотонов получено выражение для оценки вероятностей ошибочной регистрации символов «0» и символов «1» с учетом средней длительности мертвого времени продлевающегося типа. По результатам математического моделирования установлены зависимости вероятностей ошибочной регистрации двоичных данных от среднего времени однофотонной передачи информации, что позволило обосновать время однофотонной передачи, обеспечивающее наименьшие потери информации.

**Ключевые слова:** счетчик фотонов, мертвое время, однофотонный канал связи, потери информации, защита информации.

**Веб:** <http://library.miu.by/journals!/item.science-xxi/issue.8/article.2.html>

**Поступила в редакцию:** 27.09.2019

## Study of prolonged dead time of a single-photon communication channel with encoding of transmitted information with an optical pulse duration

Timofeev Alexander<sup>a</sup>

<sup>а</sup> Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Information Security, tamvks@mail.ru

### Abstract

As applied to a binary single-photon communication channel with encoding of transmitted information with an optical pulse duration and containing a photon counter as a receiving module, it has been obtained the expression for estimating the probabilities of erroneous registration of symbols «0» and symbols «1» taking into account the average duration of dead time of an extended type. According to the results of mathematical modeling there were established the dependences of erroneous registration probabilities of single-photon informational transmission binary data on the average time, which made it possible to justify the time of single-photon transmission, which ensures the least loss of information.

**Keywords:** photon counter, dead time, single-photon communication channel, information loss, information protection.

**Web:** <http://library.miu.by/journals!/item.science-xxi/issue.8/article.2.html>

**Received:** 27.09.2019

### Введение

В настоящее время в технике волоконно-оптической связи имеется потребность в создании систем связи на базе однофотонных каналов. Это обусловлено необходимостью реализации различных механизмов защиты передаваемой информации, включая конфиденциальность связи [1, 2]. Системы однофотонной связи позволяют обеспечить абсолютную скрытность и конфиденциальность передаваемой информации, однако при этом предъявляют повышенные требования к приемо-передающему оборудованию легитимных пользователей [1–5]. В частности, приемное оборудование должно обеспечивать чувствительность, достаточно высокую для регистрации оптических импульсов, в которых среднее число фотонов не превышает десяти. В противном случае решить задачи защиты передаваемой информации зачастую не представляется возможным из-за неприемлемо большого количества ошибок при передаче данных. В этой связи в качестве приемных модулей систем однофотонной связи применяют счетчики фотонов, обладающие требуемой чувствительностью [1–5]. При этом счетчики фотонов характеризуются так называемыми просчетами, влияющими на количество ошибок при регистрации данных и обусловленными наличием мертвого времени – времени, в течение которого счетчик фотонов не чувствителен к падающему на него оптическому излучению [1–6]. Известные методы оценки ошибок при передаче данных [7] не применимы для систем однофотонной связи, поскольку не учитывают мертвое время счетчика фотонов. В работе [8] дана оценка вероятности ошибочной регистрации информации для системы однофотонной связи с учетом влияния мертвого времени счетчика фотонов. Однако полученные при этом результаты применимы для каналов связи с кодированием информации мощностью оптического излучения и не могут быть использованы для каналов связи с кодированием информации длительностью оптического импульса. Поскольку до настоящего времени оценка влияния мертвого времени счетчика фотонов на вероятность ошибочной регистрации информации, передаваемой по однофотонному каналу связи с кодированием длительностью оптического импульса, не выполнялась, это и являлось целью данной работы.

Объектом исследования являлся асинхронный волоконно-оптический канал связи, в котором в качестве приемного модуля использовался счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа. Выбор в качестве объекта исследования такого канала связи объясняется тем, что в сравнении с другими системами волоконно-оптической связи обеспечивают наиболее высокие скорости передачи информации, а использование асинхронного способа передачи и приема информации позволяет упростить их за счет отсутствия дополнительных линий связи для передачи и приема синхрои́мпульсов [1, 4]. Мертвым

временем продлевающегося типа характеризуются счетчики фотонов на базе лавинных фотоприемников, включенных по схеме пассивного гашения лавины [2, 3].

Предмет исследования: установить зависимости вероятностей ошибочной регистрации двоичных данных от среднего времени однофотонной передачи символов «0» и «1» в однофотонном канале связи, в котором в качестве приемного модуля использовался счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа.

### Выражения для оценки вероятностей ошибочной регистрации двоичных данных

Вначале получим выражения для расчета вероятностей ошибочной регистрации данных, передаваемых по рассматриваемому каналу связи. Дальнейшие рассуждения будут основаны на том, что передача информации осуществляется с использованием дискретного двоичного асинхронного однородного волоконно-оптического канала связи без памяти и со стиранием. Всеми потерями информации, за исключением потерь в счетчике фотонов, пренебрегаем.

Для оценки вероятностей ошибочной регистрации двоичных данных воспользуемся методикой [8]. При подаче на вход счетчика фотонов регистрируемого излучения на его выходе формируется смесь темновых и сигнальных импульсов.

Темновые и сигнальные импульсы – это импульсы, которые появляются на выходе счетчика фотонов соответственно в отсутствие оптического сигнала и в результате воздействия фотонов регистрируемого излучения.

Следовательно, статистические распределения импульсов при наличии на входе счетчика фотонов ослабленного оптического излучения соответствуют распределению Пуассона [2, 3] и определяют выбор нижнего и верхнего пороговых уровней регистрации  $N_1$  и  $N_2$ .

Нижний и верхний пороговые уровни регистрации – это соответственно наименьшее и наибольшее число зарегистрированных на выходе счетчика фотонов импульсов, при котором делается вывод, что передан символ «0». При превышении зарегистрированных импульсов числа  $N_2$  делается вывод, что передан символ «1», а при регистрации импульсов в количестве, меньшем, чем  $N_1$ , принимается решение, что символ отсутствует.

Для рассматриваемого канала связи при передаче символов «0» и «1» используются оптические сигналы длительностью  $\Delta t_0$  и  $\Delta t_1$  соответственно ( $\Delta t_0 < \Delta t_1$ ). Между каждой парой таких сигналов существует защитный временной интервал – это интервал времени, в течение которого оптические сигналы в канал связи не передаются. Защитный временной интервал необходим для того, чтобы приемная аппаратура зарегистрировала переданный символ, и определяется как  $(\tau_b - \Delta t_0)$  и  $(\tau_b - \Delta t_1)$  в случае передачи символов

«0» и «1» соответственно, где  $\tau_b$  – среднее время передачи одного бита (символа).

Поскольку символы «0» и «1» передаются импульсами различной длительности, то на выходе счетчика фотонов за время передачи одного бита (символа) формируется различное количество электрических импульсов, которое будет прямо пропорционально длительности оптического излучения.

$$P_{out0} = 1 - \sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_s)(\Delta t_0 - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_s)(\Delta t_0 - \tau_d)]}{N!}, \quad (1)$$

$$P_{out1} = \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_t + n_s)(\Delta t_1 - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_s)(\Delta t_1 - \tau_d)]}{N!}, \quad (2)$$

где  $n_t$  – средняя скорость счета темновых импульсов на выходе счетчика фотонов;

$n_s$  – средняя скорость счета сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче двоичного символа («0» или «1»);

$\tau_d$  – средняя длительность мертвого времени продлевающегося типа.

Следует отметить, что каждая из вероятностей  $P_{out0}$  и  $P_{out1}$  имеет две составляющие. Первая составляющая определяет вероятность того, что при приеме оптического излучения счетчиком фотонов будет зарегистрировано импульсов меньше, чем нижний пороговый уровень, а вторая для  $P_{out0}$  и  $P_{out1}$  соответственно – вероятность того, что при наличии на входе счетчика фотонов оптических сигналов длительностью  $\Delta t_0$  и  $\Delta t_1$  на его выходе будет зарегистрировано импульсов больше, чем верхний пороговый уровень, и в диапазоне  $N_1 \div N_2$ . Вероятности регистрации символов «0» и «1» при наличии на входе

Поэтому число импульсов, соответствующее символу «0», будет меньше, чем число импульсов, соответствующее символу «1».

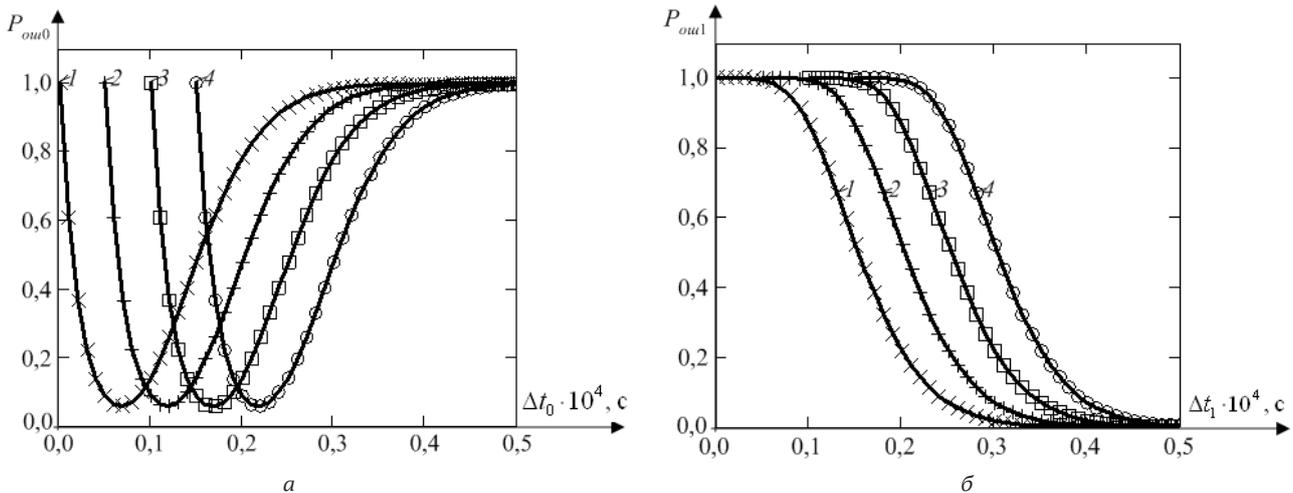
На основании представленных выше рассуждений и методики [8] применительно к счетчикам фотонов с рассматриваемым типом мертвого времени запишем выражения для вероятностей ошибочной регистрации символов «0» и «1» соответственно:

канала связи символов «0» и «1» равны соответственно  $(1 - P_{out0})$  и  $(1 - P_{out1})$ . Таким образом, выражения (1) и (2) пригодны для определения вероятностей ошибочной регистрации двоичных данных для рассматриваемого канала связи при соблюдении указанных выше ограничений.

#### Результаты моделирования и их обсуждение

Вычисление вероятностей ошибочной регистрации двоичных символов выполнялось для каналов связи, содержащих в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа при различных значениях  $\tau_d$ ,  $\Delta t_0$  и  $\Delta t_1$ .

На рисунке 1 представлены зависимости вероятностей ошибочной регистрации двоичных символов от средней длительности их передачи для различной средней длительности мертвого времени продлевающегося типа.

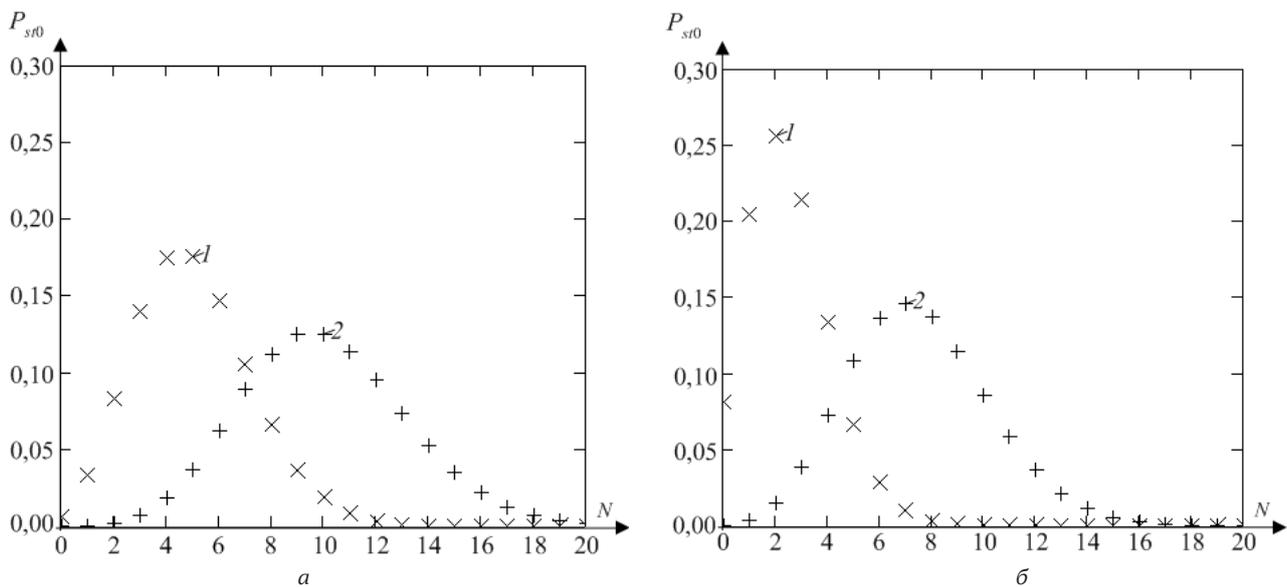


$N_1 = 1$ ,  $N_2 = 7$ ,  $n_t = 10^5 \text{ c}^{-1}$ ,  $n_s = 5 \times 10^5 \text{ c}^{-1}$ , средняя длительность передачи одного бита  $\tau_b = 100 \text{ мкс}$ , средняя длительность мертвого времени: 1 –  $\tau_d = 0$ ; 2 –  $\tau_d = 5 \text{ мкс}$ ; 3 –  $\tau_d = 10 \text{ мкс}$ ; 4 –  $\tau_d = 15 \text{ мкс}$

Рисунок 1 – Зависимости вероятностей ошибочной регистрации символов «0» (а) и символов «1» (б) от среднего времени их однофотонной передачи

Расчет проводился для одинаковых значений нижнего  $N_1 = 1$  и верхнего  $N_2 = 7$  пороговых уровней регистрации, средней скорости счета темновых импульсов  $n_t = 10^3 \text{ c}^{-1}$ , средней скорости счета сигнальных импульсов  $n_s = 5 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$  и среднего времени передачи одного бита (символа)  $\tau_b = 100 \text{ мкс}$  как при исследовании зависимости  $P_{out0}(\Delta t_0)$ , так и при исследовании зависимости  $P_{out1}(\Delta t_1)$ . Необходимо отметить, что пороговые уровни регистрации можно выбирать и другие, отличные от 1 и 7, но при сравнении значений  $P_{out0}(\Delta t_0)$  и  $P_{out1}(\Delta t_1)$  для различных средних длительностей мертвого времени следует фиксировать  $N_1$  и  $N_2$  постоянными, как и среднее значение скорости счета темновых импульсов  $n_t$ , среднее значение скорости счета сигнальных импульсов  $n_s$  и среднее время передачи одного бита (символа)  $\tau_b$ . При этом важно учитывать, что  $\tau_d$  не может превышать  $\Delta t_0$  и  $\Delta t_1$ , которые в свою очередь должны быть меньше средней длительности передачи одного бита (символа)  $\tau_b$  на величину защитного временного интервала; в противном случае использование счетчиков фотонов для регистрации данных становится невозможным [1, 4]. Отметим, что при других значениях  $N_1$  и  $N_2$  и отношениях  $\tau_d/\Delta t_0$ ,  $\tau_d/\Delta t_1$  и  $n_t/n_s$  проявление эффекта мертвого времени продлевающегося типа для рассматриваемого канала связи аналогично представленному на рисунке 1. Как видно из полученных результатов, при прочих равных параметрах рост средней длительности мертвого времени продлевающегося типа приводит к увеличению среднего

времени однофотонной передачи символов «0»  $\Delta t_0$  и символов «1»  $\Delta t_1$ , при которых достигаются наименьшие значения  $P_{out0}$  и  $P_{out1}$ . Например, наименьшие значения  $P_{out0} = 0,06$  и  $P_{out1} = 0,00$  достигаются соответственно при  $\Delta t_0 = 7 \text{ мкс}$  и  $\Delta t_1 = 33 \text{ мкс}$  для  $\tau_d = 0$ ; при  $\Delta t_0 = 12 \text{ мкс}$  и  $\Delta t_1 = 38 \text{ мкс}$  для  $\tau_d = 5 \text{ мкс}$ ; при  $\Delta t_0 = 17 \text{ мкс}$  и  $\Delta t_1 = 43 \text{ мкс}$  для  $\tau_d = 10 \text{ мкс}$ ; при  $\Delta t_0 = 22 \text{ мкс}$  и  $\Delta t_1 = 48 \text{ мкс}$  для  $\tau_d = 15 \text{ мкс}$ . При этом с увеличением  $\Delta t_0$  зависимости  $P_{out0}(\Delta t_0)$  вначале уменьшаются, достигая своих наименьших значений, после чего растут вплоть до насыщения (см. рисунок 1, а); с увеличением  $\Delta t_1$  зависимости  $P_{out1}(\Delta t_1)$  вначале практически не изменяются и близки к 1, после чего уменьшаются до своих наименьших значений и переходят в насыщение (см. рисунок 1, б). Такое поведение зависимостей  $P_{out0}(\Delta t_0)$  и  $P_{out1}(\Delta t_1)$  объясняется смещением соответствующих статистических распределений смеси числа темновых и сигнальных импульсов  $P_{st0}(N)$  и  $P_{st1}(N)$  при передаче символов «0» и «1». Указанные статистические распределения для рассматриваемого канала связи можно получить, используя выражения (1) и (2) и методику [8]. По результатам выполненных исследований установлено, что время однофотонной передачи символов («0» или «1»), как и мертвое время продлевающегося типа, оказывают схожее влияние на распределения  $P_{st0}(N)$  и  $P_{st1}(N)$ . В связи с этим на рисунке 2 проиллюстрированы только статистические распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов при передаче символов «0»  $P_{st0}(N)$ .



$n_t = 10^3 \text{ c}^{-1}$ ,  $n_s = 5 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$ , среднее время передачи одного бита (символа)  $\tau_b = 100 \text{ мкс}$ , среднее время однофотонной передачи символов «0»: 1 -  $\times \Delta t_0 = 10 \text{ мкс}$ ; 2 -  $+ \Delta t_0 = 20 \text{ мкс}$

Рисунок 2 – Статистические распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов при передаче символов «0» при  $\tau_d = 0$  (а) и  $\tau_d = 5 \text{ мкс}$  (б)

Распределения  $P_{st0}(N)$  построены для одинаковых значений  $n_t = 10^3 \text{ c}^{-1}$ ,  $n_s = 5 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$  и  $\tau_b = 100 \text{ мкс}$  исходя из тех же соображений, как и в случае установления зависимостей  $P_{out0}(\Delta t_0)$  и  $P_{out1}(\Delta t_1)$ .

Из рисунка 2 видно, что распределения  $P_{st0}(N)$  имеют явно выраженный максимум, свойственный распределению Пуассона. Это наблюдается как при наличии мертвого времени продлевающегося

типа (см. рисунок 2, б), так и при его отсутствии (см. рисунок 2, а). Причем при прочих равных параметрах увеличение среднего времени однофотонной передачи символов «0» приводит к смещению максимумов статистических распределений  $P_{st0}(N)$  в сторону больших значений  $N$ , а рост средней длительности мертвого времени продлевающегося типа способствует смещению этих максимумов в сторону меньших значений  $N$ . В результате, когда  $\Delta t_0 = \tau_d$  и  $\Delta t_1 = \tau_d$ , максимумы соответствующих распределений  $P_{st0}(N)$  и  $P_{st1}(N)$  имеют место при  $N = 0$ . В этом случае вероятность отсутствия импульсов на выходе счетчика фотонов достаточно большая, что определяет высокую вероятность ошибочной регистрации как символов «0», так и символов «1» (см. рисунок 1), поэтому  $P_{out0} = P_{out1} = 1$ .

При прочих равных параметрах с увеличением  $\Delta t_0$  вероятность регистрации импульсов на выходе счетчика фотонов в количестве, большем нуля, повышается за счет сдвига максимумов распределений  $P_{st0}(N)$  в сторону больших значений  $N$  (см. рисунок 2). В результате увеличивается вероятность регистрации импульсов от нижнего до верхнего порогового уровня. Как следует из формулы (1), это уменьшает вероятность  $P_{out0}$ , поэтому зависимости  $P_{out0}(\Delta t_0)$  спадают вплоть до своих наименьших значений (см. рисунок 1, а).

Как отмечалось ранее, среднее время однофотонной передачи символов «1» влияет на распределения  $P_{st1}(N)$  аналогичным образом, как и длительность  $\Delta t_0$  влияет на  $P_{st0}(N)$ : при прочих равных параметрах с увеличением  $\Delta t_1$  наблюдается сдвиг максимумов распределений  $P_{st1}(N)$  в сторону больших значений  $N$ . В этом случае такой сдвиг распределений  $P_{st1}(N)$  повышает вероятность регистрации импульсов на выходе счетчика фотонов в количестве, большем нуля, однако при этом вероятность регистрации импульсов в количестве, превышающем верхний пороговый уровень, практически не меняется и остается близкой к 0. Следовательно, согласно выражению (2),  $P_{out1} \approx 1$ , поэтому зависимости  $P_{out1}(\Delta t_1) \approx 1$  (см. рисунок 1, б). При дальнейшем увеличении  $\Delta t_1$  максимумы распределений  $P_{st1}(N)$  продолжают смещаться в сторону больших значений  $N$ . Это приводит к росту вероятности регистрации импульсов в количестве, превышающем верхний пороговый уровень, поэтому  $P_{out1}$  уменьшаются и зависимости  $P_{out1}(\Delta t_1)$  спадают до своих наименьших значений (см. рисунок 1, б). В результате при прочих равных параметрах спад зависимостей  $P_{out1}(\Delta t_1)$  начинает проявляться при более высоких значениях средней длительности однофотонной передачи символов «1», чем в случае передачи символов «0» начинает проявляться аналогичный спад зависимостей  $P_{out0}(\Delta t_0)$ . Так, например, спад зависимостей  $P_{out0}(\Delta t_0)$  и  $P_{out1}(\Delta t_1)$  соответственно имеет место при  $0 < \Delta t_0 < 7$  мкс и  $6$  мкс  $< \Delta t_1 < 33$  мкс для  $\tau_d = 0$ ; при  $5$  мкс  $< \Delta t_0 < 12$  мкс и  $11$  мкс  $< \Delta t_1 < 38$  мкс для  $\tau_d = 5$  мкс; при

$10$  мкс  $< \Delta t_0 < 17$  мкс и  $16$  мкс  $< \Delta t_1 < 43$  мкс для  $\tau_d = 10$  мкс; при  $15$  мкс  $< \Delta t_0 < 22$  мкс и  $21$  мкс  $< \Delta t_1 < 48$  мкс для  $\tau_d = 15$  мкс. Продолжающийся рост  $\Delta t_0$  и  $\Delta t_1$  способствует дальнейшему сдвигу максимумов соответствующих статистических распределений  $P_{st0}(N)$  и  $P_{st1}(N)$  в сторону больших значений  $N$ , что увеличивает вероятность регистрации импульсов в количестве, превышающем верхний пороговый уровень. Это приводит к тому, что после достижения своих наименьших значений зависимости  $P_{out1}(\Delta t_1)$  переходят в насыщение (см. рисунок 1, б). Однако зависимости  $P_{out0}(\Delta t_0)$ , достигнув своих наименьших значений, растут вплоть до наибольших значений, после чего переходят в насыщение (см. рисунок 1, а).

Сдвиг максимумов статистических распределений  $P_{st0}(N)$  и  $P_{st1}(N)$  в сторону меньших значений  $N$ , наблюдающийся при увеличении  $\tau_d$  при прочих равных параметрах (см. рисунок 2), приводит к следующему. При  $N > N_2$  такой сдвиг приближает максимумы статистических распределений и к 0 и к верхнему пороговому уровню регистрации; в противном случае – приближает к 0 и при этом отдаляет от  $N_2$ . В результате в диапазонах значений  $\Delta t_0$  и  $\Delta t_1$ , на которых соответствующие зависимости  $P_{out0}(\Delta t_0)$  и  $P_{out1}(\Delta t_1)$  уменьшаются, с увеличением средней длительности мертвого времени продлевающегося типа вероятности  $P_{out0}$  и  $P_{out1}$  растут при прочих равных параметрах (см. рисунок 1). Так, например, при  $\Delta t_0 = 11$  мкс вероятности ошибочной регистрации символов «0»  $P_{out0}$  для  $\tau_d = 5$  мкс и  $\tau_d = 10$  мкс равны соответственно  $6,15 \cdot 10^{-2}$  и  $60,59 \cdot 10^{-2}$ ; при  $\Delta t_1 = 35$  мкс вероятности ошибочной регистрации символов «1»  $P_{out1}$  для  $\tau_d = 5$  мкс и  $\tau_d = 10$  мкс равны соответственно  $1,77 \cdot 10^{-2}$  и  $6,89 \cdot 10^{-2}$ .

Однако в диапазонах значений  $\Delta t_0$ , на которых зависимости  $P_{out0}(\Delta t_0)$  растут, увеличение  $\tau_d$  приводит к снижению  $P_{out0}$  при прочих равных параметрах (см. рисунок 1, а). В результате, например, при  $\Delta t_0 = 18$  мкс вероятности ошибочной регистрации символов «0»  $P_{out0}$  для  $\tau_d = 5$  мкс и  $\tau_d = 10$  мкс равны соответственно  $33,06 \cdot 10^{-2}$  и  $6,98 \cdot 10^{-2}$ . Указанные особенности смещения максимумов статистических распределений  $P_{st0}(N)$  и  $P_{st1}(N)$  с ростом средней длительности мертвого времени продлевающегося типа при прочих равных параметрах также приводят к тому, что наименьшие значения  $P_{out0}$  и  $P_{out1}$  наблюдаются при более высоких значениях  $\Delta t_0$  и  $\Delta t_1$  с соответственно (см. рисунок 1).

### Заключение

Получены выражения для расчета вероятностей ошибочной регистрации символов «0» и «1», которые позволяют оценить потери информации, передаваемой по дискретному двоичному асинхронному однородному однофотонному каналу связи без памяти и со стиранием, в котором кодирование передаваемой информации осуществляется длительностью

оптического импульса и в качестве приемного модуля используется счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа.

Установлено, что с ростом средней длительности мертвого времени продлевающегося типа наименьшие значения вероятностей ошибочной регистрации символов «0»  $P_{ош0}$  и символов «1»  $P_{ош1}$  имеют место при более высоких значениях среднего времени однофотонной передачи символов «0»  $\Delta t_0$  и символов «1»  $\Delta t_1$  соответственно. Так, например, наименьшие значения  $P_{ош0} = 0,06$  и  $P_{ош1} = 0,00$  достигаются соответственно при  $\Delta t_0 = 7$  мкс и  $\Delta t_1 = 33$  мкс для  $\tau_d = 0$ ; при  $\Delta t_0 = 12$  мкс и  $\Delta t_1 = 38$  мкс для  $\tau_d = 5$  мкс; при  $\Delta t_0 = 17$  мкс и  $\Delta t_1 = 43$  мкс для  $\tau_d = 10$  мкс; при  $\Delta t_0 = 22$  мкс и  $\Delta t_1 = 48$  мкс для  $\tau_d = 15$  мкс.

Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы при создании систем квантово-криптографической асинхронной связи, позво-

ляющих с высокой достоверностью выявлять несанкционированный доступ к каналу связи за счет уменьшения погрешности определения количества ошибок легитимного приемного оборудования, в качестве которого используются счетчики фотонов с мертвым временем продлевающегося типа. Автору настоящей работы представляются весьма актуальными исследования, направленные на обоснование выбора лавинного фотоприемника, используемого при построении счетчика фотонов. Такие фотоприемники могут отличаться как по структуре полупроводниковых областей, так и по площади фоточувствительной поверхности. В этой связи в ходе дальнейших комплексных исследований планируется определить, как эти параметры влияют на вероятность ошибочной регистрации данных для рассматриваемого канала связи.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Тимофеев, А.М. Устройство для передачи и приема двоичных данных по волоконно-оптическому каналу связи / А.М. Тимофеев // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9.– № 1. – С. 17–27.  
Timofeev, A.M. Ustroystvo dlya peredachi i priyema dvoichnykh dannykh po volokonno-opticheskomu kanalu svyazi / A.M. Timofeyev // Pribory i metody izmereniy. – 2018. – Т. 9.– № 1. – Р. 17–27.
2. Килин, С.Я. Квантовая криптография: идеи и практика / С.Я. Килин. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 391 с.  
Kilin, S.Ya. Kvantovaya kriptografiya: idei i praktika / S.Ya. Kilin. – Minsk: Belorus. nauka, 2007. – 391 p.
3. Гулаков, И.Р. Фотоприемники квантовых систем / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 276 с.  
Gulakov, I.R. Fotopriyemniki kvantovykh sistem / I.R. Gulakov, A.O. Zenevich. – Minsk: UO VGKS, 2012. – 276 p.
4. Тимофеев, А.М. Достоверность принятой информации при ее регистрации в однофотонном канале связи при помощи счетчика фотонов / А.М. Тимофеев // Информатика. – 2019. – Т. 16. – № 2. – С. 90–98.  
Timofeev, A.M. Dostovernost' prinyatoy informatsii pri yeye registratsii v odnofotonnom kanale svyazi pri pomoshchi schetchika fotonov / A.M. Timofeyev // Informatika. – 2019. – Т. 16. – № 2. – Р. 90–98.
5. 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.  
Timofeev, A.M. Vliyaniye vremeni odnofotonnoy peredachi informatsii na dostovernost' yeye priyema v kvantovo-kriptograficheskom kanale svyazi / A.M. Timofeyev // Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika. – 2019.– № 1. – Р. 67–72.
6. Single-photon detectors combining high efficiency, high detection rates, and ultra-high timing resolution / I.E. Zadeh [et al.] // APL Photonics. – 2017. – Vol. 2. – P. 111301-1-111301-7.
7. Дмитриев, С.А. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы / С.А. Дмитриев, Н.Н. Слепов. – М.: ООО «Волоконно-оптическая техника», 2005. – 576 с.  
Dmitriyev, S.A. Volokonno-opticheskaya tekhnika: sovremennoye sostoyaniye i perspektivy / S.A. Dmitriyev, N.N. Slepov. – М.: ООО «Volokonno-opticheskaya tekhnika», 2005. – 576 p.
8. 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 (147). – С. 56–62.  
Timofeev, A.M. Otsenka vliyaniya prodlevayushchegosya mertvogo vremeni schetchika fotonov na veroyatnost' oshibochnoy registratsii dannykh kvantovo-kriptograficheskikh kanalov svyazi / A.M. Timofeyev // Vestnik svyazi. – 2018. – № 1 (147). – Р. 56–62.