

ISSN 1816-0301 (Print)
ISSN 2617-6963 (Online)

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ И НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ
INFORMATION PROTECTION AND SYSTEM RELIABILITY

УДК 621.383

Поступила в редакцию 14.01.2019
Received 14.01.2019

Принята к публикации 15.02.2019
Accepted 15.02.2019

**Достоверность принятой информации при ее регистрации
в однофотонном канале связи при помощи счетчика фотонов**

А. М. Тимофеев

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Беларусь
E-mail: tamvks@mail.ru*

Аннотация. При измерении маломощных оптических сигналов приемные модули систем должны обеспечивать достаточно высокую достоверность принятых данных. В этой связи целесообразно использовать высокочувствительные счетчики фотонов, которым, однако, присущи ошибки регистрации данных. Поэтому целью работы является оценка влияния средней скорости счета импульсов на выходе счетчика фотонов на достоверность принятой информации с учетом мертвого времени счетчика фотонов.

Получено выражение для расчета достоверности данных, принятых по асинхронному двоичному несимметричному однородному каналу связи без памяти и со стиранием, в котором в качестве приемного модуля используется счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа.

По результатам математического моделирования установлено, что с ростом средней скорости счета сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче символов 1 (n_{s1}) достоверность принятых данных D растет, достигая насыщения. При прочих равных параметрах с увеличением средней длительности мертвого времени продлевающегося типа (τ_d) насыщение зависимости $D(n_{s1})$ наблюдается при больших значениях средней скорости счета сигнальных импульсов: $n_{s1} \geq 35,0 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 0$; $n_{s1} \geq 38,9 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 5 \text{ мкс}$; $n_{s1} \geq 43,7 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 10 \text{ мкс}$; $n_{s1} \geq 50,0 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 15 \text{ мкс}$.

Ключевые слова: канал связи, однофотонная передача информации, достоверность принятой информации, счетчик фотонов, мертвое время

Для цитирования. 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.

**The reliability of the received information if it is registered
in the single photon communication channel using
the photon counter**

Alexander M. Timofeev

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus
E-mail: tamvks@mail.ru*

Abstract. When measuring low-power optical signals, the receiving modules of systems should ensure a sufficiently high accuracy of the received data. In this regard, it is advisable to use photon counters. They are highly sensitive, but are characterized by data recording errors. The aim of this work is to determine the

influence of average pulse count rate of photons as the output of the counter on the fidelity of received information taking into account also the dead time of the counter.

The formula is obtained for calculating the reliability of data received over an asynchronous binary asymmetric homogeneous communication channel without memory with erasure, when photon counter with a dead time of prolonging type was used as a receiving module.

According to the results of mathematical modeling, it was established that with an increase in the average count rate of signal pulses at the output of the photon counter in symbols 1 (n_{s1}), the reliability of the received data D grows up to saturation. Moreover, when other parameters being equal, with an increase of the average duration of the dead time of a prolonged type (τ_d), the saturation of the $D(n_{s1})$ dependence is fixed for large values of the average counting rate of signal pulses. For example, with $n_{s1} \geq 35,0 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ for $\tau_d = 0$; with $n_{s1} \geq 38,9 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ for $\tau_d = 5 \text{ } \mu\text{s}$; with $n_{s1} \geq 43,7 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ for $\tau_d = 10 \text{ } \mu\text{s}$; with $n_{s1} \geq 50,0 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ for $\tau_d = 15 \text{ } \mu\text{s}$.

Keywords: communication channel, single photon information transfer, reliability of the received information, photon counter, dead time

For citation. Timofeev A. M. The reliability of the received information if it is registered in the single photon communication channel using the photon counter. *Informatics*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 90–98 (in Russian).

Введение. Одной из основных задач, решаемых при построении волоконно-оптических каналов связи, в которых информационная безопасность достигается за счет использования маломощных оптических импульсов, является обеспечение достаточно высокой достоверности данных при их регистрации [1–3]. Под достоверностью будем понимать вероятность того, что принятые данные соответствуют переданным [3]. При использовании маломощных оптических импульсов, содержащих не более десяти фотонов в расчете на каждый бит (символ), что имеет место для квантово-криптографических каналов связи, решение указанной задачи возможно благодаря применению высокочувствительных приемных модулей – счетчиков фотонов, построенных на базе лавинных фотоприемников [1–4]. Известные методы оценки показателей надежности, учитывающие ошибки при передаче информации, не применимы для однофотонных каналов связи. Так, например, методы, представленные в работах [5–8], не учитывают мертвое время счетчика фотонов. В течение мертвого времени счетчик фотонов не чувствителен к падающему на него оптическому излучению [1, 2, 9, 10]. В результате возникают так называемые просчеты, которые влияют на количество ошибок при регистрации данных, а следовательно, и на достоверность принятых данных. В работе [4] применительно к однофотонным каналам связи получены выражения для оценки вероятностей ошибочной регистрации двоичных символов 0 и 1, которые учитывают длительность мертвого времени счетчика фотонов. Однако данные, как правило, представляют собой не одноименные символы, а последовательности, содержащие как символы 0, так и символы 1.

Целью настоящего исследования являлось установление влияния скорости счета импульсов на выходе счетчика фотонов на достоверность принятой информации при передаче данных по однофотонному каналу связи с учетом мертвого времени счетчика фотонов.

Объектом исследования был асинхронный двоичный несимметричный однородный однофотонный канал связи без памяти и со стиранием, содержащий в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа. Выбор в качестве объекта исследования такого канала связи обусловлен тем, что его использование не требует наличия дополнительных линий связи для передачи и приема синхроимпульсов [2–4, 11]. Мертвым временем продлевающегося типа характеризуются счетчики фотонов на базе лавинных фотоприемников, включенных по схеме пассивного гашения лавины [2].

Выражение для оценки достоверности принятых данных. Дальнейшие рассуждения будут основаны на том, что передача информации осуществляется по однофотонному каналу связи двоичными символами (0 и 1) в течение времени τ_b . При этом 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 линию связи в течение времени однофотонной передачи $\Delta t = \tau_b / 2$, а прием ведется с помощью счетчика фотонов, выполненного на базе лавинного фотоприемника, включенного по схеме пассивного гашения лавины [2]. Следовательно, в течение времени $t_s = \tau_b / 2$ данные в канал связи не передаются, т. е. между каждой парой символов находится так называемый «защитный» временной интер-

вал. Поскольку символы 0 и 1 передаются импульсами различной мощности, то на выходе счетчика фотонов за время Δt формируется различное количество электрических импульсов, которое будет прямо пропорционально мощности оптического излучения. Всеми потерями информации, за исключением потерь в счетчике фотонов, пренебрегаем.

Обозначим вероятности появления символов 0 и 1 на выходе канала связи как $P'_s(0)$ и $P'_s(1)$ соответственно. Поскольку в общем случае принимаемые двоичные данные содержат как символы 0, так и символы 1, для оценки достоверности принятых данных воспользуемся формулой

$$D = P'_s(0)D_0 + P'_s(1)D_1, \quad (1)$$

где D_0 и D_1 – достоверности принятых символов 0 и 1 соответственно.

Достоверности D_0 и D_1 можно определить на основании соответствующих вероятностей ошибочной регистрации символов 0 и 1 ($P_{ош0}$ и $P_{ош1}$), полученных в работе [4]. При этом необходимо учитывать следующее. Если число зарегистрированных на выходе счетчика фотонов импульсов находится в диапазоне от нижнего порогового уровня регистрации N_1 до верхнего порогового уровня регистрации N_2 , делается вывод, что передан символ 0. При превышении зарегистрированных импульсов числа N_2 делается вывод, что передан символ 1. В случае регистрации импульсов в количестве, меньшем N_1 , принимается решение, что символ отсутствует.

Таким образом, алфавит кодовых слов на входе канала связи не совпадает с алфавитом кодовых слов на его выходе. Вероятность отсутствия символа 0 или 1 на выходе канала связи, как и вероятность его приема, не зависит ни от того, какой символ был на входе канала, ни от ранее принятых символов. При передаче символа 0 или 1 на выходе канала связи может быть не зарегистрировано ни символа 0, ни символа 1. Следовательно, рассматриваемый канал связи является однофотонным асинхронным двоичным несимметричным однородным без памяти и со стиранием [12].

Учитывая приведенные выше рассуждения, можно записать:

$$D_0 = \frac{P(0/0)}{P(0/0) + P(0/1)}, \quad (2)$$

$$D_1 = \frac{P(1/1)}{P(1/1) + P(1/0)}, \quad (3)$$

где $P(0/0)$ и $P(1/1)$ – вероятности регистрации на выходе канала связи символов 0 и 1 соответственно при их наличии на входе канала связи; $P(0/1)$ и $P(1/0)$ – вероятности регистрации на выходе канала связи символов 0 и 1 при наличии на входе канала связи символов 1 и 0 соответственно.

Переходные вероятности $P(0/0)$, $P(0/1)$ и $P(1/1)$, $P(1/0)$, входящие в соответствующие выражения (2) и (3), могут быть рассчитаны на основании статистических распределений числа импульсов на выходе счетчика фотонов [13]:

$$P(0/0) = \sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}, \quad (4)$$

$$P(0/1) = \sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}, \quad (5)$$

$$P(1/1) = 1 - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}, \quad (6)$$

$$P(1/0) = 1 - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}, \quad (7)$$

где n_t – средняя скорость счета темновых импульсов на выходе счетчика фотонов; n_{s0} и n_{s1} – средние скорости счета сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче символов 0 и 1 соответственно; τ_d – средняя длительность мертвого времени продлевающегося типа.

Отметим, что для оценки мертвого времени продлевающегося типа используют среднее значение, так как его длительность зависит от интенсивности оптического излучения [2].

Темновые и сигнальные – это импульсы, которые появляются на выходе счетчика фотонов соответственно при отсутствии оптического сигнала и в результате воздействия фотонов регистрируемого излучения [1, 2].

Предположим, что на выходе рассматриваемого канала связи зарегистрирована случайная последовательность двоичных данных, для которой $P'_s(0) = P'_s(1) = 0,5$. В этом случае достоверность принятых данных определяется подстановкой формул (2) и (3) в (1) с учетом выражений (4)–(7) и окончательно примет следующий вид:

$$D = 0,5 \times \left\{ \frac{\sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}}{\sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} + \sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}}{2 - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}} \right\} \quad (8)$$

Результаты математического моделирования и их обсуждение. Вычисление достоверности принятых данных выполнялось для каналов связи, содержащих в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа при различных значениях τ_d и n_{s1} .

На рис. 1 представлена зависимость достоверности принятых данных от средней скорости счета сигнальных импульсов n_{s1} для различных средних длительностей мертвого времени продлевающегося типа.

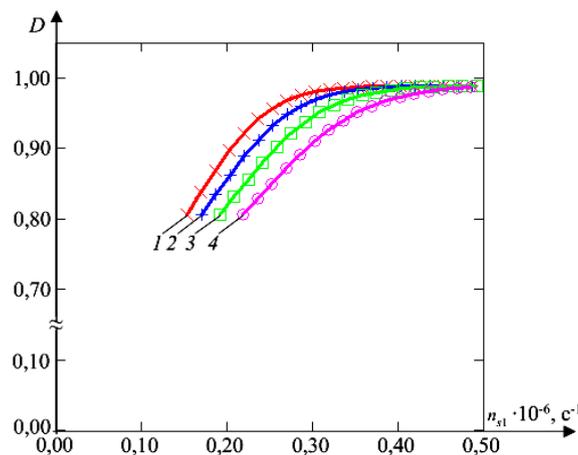


Рис. 1. Зависимость достоверности принятых данных от средней скорости счета сигнальных импульсов n_{s1} при $N_1 = 1$, $N_2 = 7$, $n_t = 10^3 \text{ c}^{-1}$, $\tau_b = 100 \text{ мкс}$

Средняя длительность мертвого времени:
1 – $\times \tau_d = 0 \text{ мкс}$, 2 – $+ \tau_d = 5 \text{ мкс}$, 3 – $\square \tau_d = 10 \text{ мкс}$, 4 – $\circ \tau_d = 15 \text{ мкс}$

Зависимости $D(n_{s1})$ построены в диапазонах средних скоростей счета сигнальных импульсов, на которых переходные вероятности $P(1/1)$ больше либо равны 0,5 при заданных средних длительностях мертвого времени продлевающегося типа. Это обусловлено тем, что при $P(1/1) < 0,5$ использование счетчиков фотонов для регистрации данных в рассматриваемом канале связи становится нецелесообразным. Для сравнения полученных зависимостей $D(n_{s1})$ величины средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s0} фиксировались постоянными и выбирались по методике, описанной в работе [3]. Вначале определялись диапазоны средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s0} , на которых переходные вероятности $P(0/0)$ больше либо равны 0,5 при заданных средних длительностях мертвого времени продлевающегося типа, по аналогии с выбором диапазона значений n_{s1} . Затем из каждого полученного диапазона выбиралось оптимальное значение n_{s0} . При этом критерием оптимальности являлось наименьшее значение n_{s0} , при котором переходная вероятность $P(1/0)$ минимальна. Такой выбор скорости счета сигнальных импульсов n_{s0} позволяет обеспечить наибольшее значение достоверности принятых данных. Расчет проводился для одинаковых значений нижнего и верхнего пороговых уровней регистрации $N_1 = 1$ и $N_2 = 7$, средней скорости счета темновых импульсов $n_t = 10^3 \text{ с}^{-1}$ и среднего времени передачи одного бита (символа) $\tau_b = 100 \text{ мкс}$. Отметим, что пороговые уровни регистрации N_1 и N_2 можно выбирать и другими, отличными от 1 и 7, но при сравнении зависимостей $D(n_{s1})$ для различных средних длительностей мертвого времени N_1 и N_2 следует фиксировать постоянными, как и среднее значение скорости счета темновых импульсов n_t , и среднее время передачи одного бита (символа) τ_b . При этом важно учитывать, что для рассматриваемого канала связи τ_d не может превышать Δt , которое, в свою очередь, должно быть меньше средней длительности передачи одного бита (символа) τ_b на величину защитного временного интервала. В противном случае использование счетчиков фотонов для регистрации данных становится нецелесообразным [14]. Отметим, что при других значениях N_1 , N_2 и отношениях $\tau_d/\Delta t$, n_t/n_{s0} и n_t/n_{s1} проявление эффекта мертвого времени продлевающегося типа для рассматриваемого канала связи аналогично представленному на рис. 1.

Из полученных результатов видно, что с увеличением средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s1} зависимости $D(n_{s1})$ растут, достигая насыщения, что имеет место для всех исследуемых значений τ_d (см. рис. 1). С увеличением средних длительностей мертвого времени продлевающегося типа τ_d это насыщение происходит при больших значениях n_{s1} : $n_{s1} \geq 35,0 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 0$; $n_{s1} \geq 38,9 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 5 \text{ мкс}$; $n_{s1} \geq 43,7 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 10 \text{ мкс}$; $n_{s1} \geq 50,0 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 15 \text{ мкс}$.

Указанные особенности поведения зависимостей $D(n_{s1})$ объясняются характером изменения переходных вероятностей $P(1/1)$ и $P(0/1)$ с увеличением средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s1} (рис. 2).

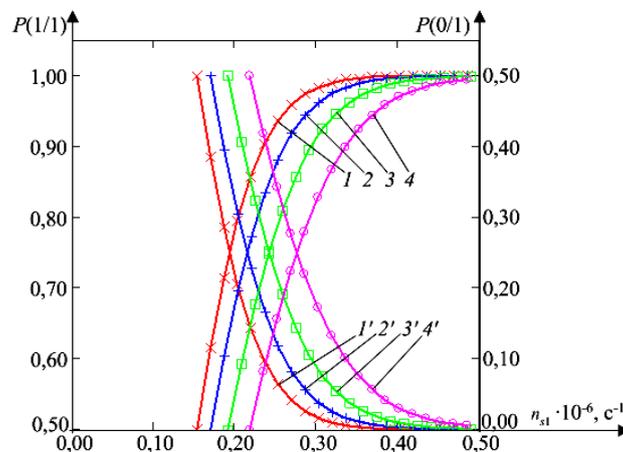


Рис. 2. Зависимости переходных вероятностей $P(1/1)$, кривые 1–4, и $P(0/1)$, кривые 1'–4', от средней скорости счета сигнальных импульсов n_{s1} при $N_1 = 1$, $N_2 = 7$, $n_t = 10^3 \text{ с}^{-1}$, $\tau_b = 100 \text{ мкс}$

Средняя длительность мертвого времени: 1 и 1' – $\tau_d = 0 \text{ мкс}$,
2 и 2' – $\tau_d = 5 \text{ мкс}$, 3 и 3' – $\tau_d = 10 \text{ мкс}$, 4 и 4' – $\tau_d = 15 \text{ мкс}$

На рис. 2 видно, что с увеличением средней скорости счета сигнальных импульсов n_{s1} вероятность $P(1/1)$ растет вплоть до насыщения, а вероятность $P(0/1)$ уменьшается, также переходя в насыщение. Это наблюдается как при наличии мертвого времени продлевающегося типа (см. рис. 2, кривые 2–4, 2'–4'), так и при его отсутствии (см. рис. 2, кривые 1 и 1'). Насыщение зависимостей $P(1/1)$ и $P(0/1)$ от n_{s1} происходит при одних и тех же средних скоростях счета сигнальных импульсов n_{s1} для соответствующих средних длительностей мертвого времени продлевающегося типа: $n_{s1} = 35,0 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 0$; $n_{s1} = 38,9 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 5 \text{ мкс}$; $n_{s1} = 43,7 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 10 \text{ мкс}$; $n_{s1} = 50,0 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 15 \text{ мкс}$. Такое поведение зависимостей $P(1/1)$ и $P(0/1)$ с ростом n_{s1} объясняется тем, что статистические распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при регистрации символов 1 $P_{st1}(N)$ имеют явно выраженный максимум, свойственный распределению Пуассона [1–4]. Для всех исследуемых диапазонов n_{s1} при наименьших значениях средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s1} этот максимум находится между нижним N_1 и верхним N_2 пороговыми уровнями регистрации. В данном случае достаточно велика вероятность того, что на выходе канала связи будет зарегистрирован символ 0 в то время, когда на вход канала связи подается символ 1, поэтому переходная вероятность $P(0/1)$ максимальна, что, в свою очередь, не позволяет достичь наибольшего значения переходной вероятности $P(1/1)$. С увеличением n_{s1} происходит сдвиг максимумов статистических распределений $P_{st1}(N)$ в сторону больших значений N [4]. Следовательно, повышается вероятность регистрации на выходе счетчика фотонов импульсов в количестве, превышающем верхний пороговый уровень регистрации (N_2), поэтому переходная вероятность $P(0/1)$ уменьшается вплоть до наименьшего значения, а переходная вероятность $P(1/1)$ растет, достигая наибольшего значения (см. рис. 2).

В результате в диапазоне n_{s1} , на котором с увеличением n_{s1} переходная вероятность $P(1/1)$ растет, а переходная вероятность $P(0/1)$ уменьшается, рост зависимости $D(n_{s1})$ объясняется снижением отношения $P(0/1) / P(1/1)$ с увеличением n_{s1} (рис. 3).

В диапазоне n_{s1} , на котором $P(1/1) \approx 1$ и $P(0/1) \approx 0$, зависимость $D(n_{s1})$ практически неизменна и близка к единице за счет того, что отношение $P(0/1) / P(1/1) \approx 0$ (см. рис. 1–3).

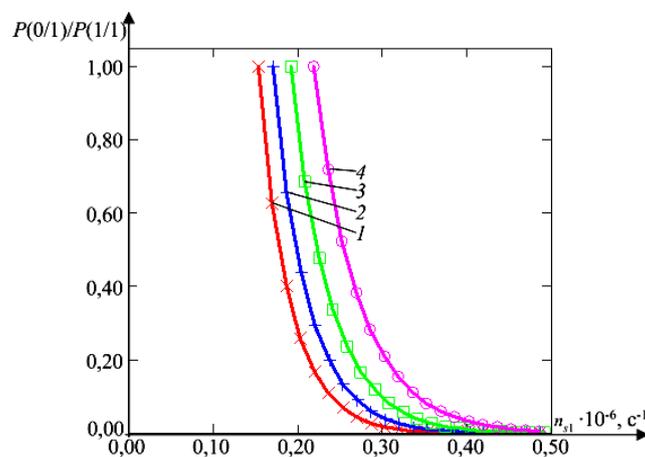


Рис. 3. Зависимость отношения $P(0/1) / P(1/1)$ от средней скорости счета сигнальных импульсов n_{s1} при $N_1 = 1$, $N_2 = 7$, $n_t = 10^3 \text{ с}^{-1}$, $\tau_b = 100 \text{ мкс}$

Средняя длительность мертвого времени:
1 – \times $\tau_d = 0 \text{ мкс}$, 2 – $+$ $\tau_d = 5 \text{ мкс}$, 3 – \square $\tau_d = 10 \text{ мкс}$, 4 – \circ $\tau_d = 15 \text{ мкс}$

Как показано на рис. 2, в диапазонах средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s1} , на которых зависимости $P(1/1)$ от n_{s1} растут, а $P(0/1)$ от n_{s1} уменьшаются, увеличение средней длительности мертвого времени продлевающегося типа при прочих равных параметрах приводит к уменьшению переходных вероятностей $P(1/1)$ и к росту переходных вероятностей $P(0/1)$. Это обусловлено тем, что при увеличении τ_d максимумы статистических распределений $P_{st1}(N)$ сдвигаются в сторону меньших значений N [4]. В результате такого смещения повышается ве-

роятность регистрации на выходе счетчика фотонов импульсов в количестве, меньшем N_2 , поэтому $P(1/1)$ уменьшается, а $P(0/1)$ растет. Так, например, при $n_{s1} = 33,0 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ переходные вероятности $P(1/1)$ и $P(0/1)$ равны соответственно $99,28 \times 10^{-2}$ и $0,72 \times 10^{-2}$ для $\tau_d = 0$; $98,09 \times 10^{-2}$ и $1,91 \times 10^{-2}$ для $\tau_d = 5$ мкс; $95,24 \times 10^{-2}$ и $4,76 \times 10^{-2}$ для $\tau_d = 10$ мкс; $89,07 \times 10^{-2}$ и $10,93 \times 10^{-2}$ для $\tau_d = 15$ мкс. Это приводит к тому, что на всех исследуемых диапазонах средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s1} при прочих равных параметрах с увеличением τ_d достоверность принятых данных уменьшается за счет роста отношения $P(0/1) / P(1/1)$. В результате, например, при $n_{s1} = 28,0 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ достоверность принятых данных D и отношение $P(0/1) / P(1/1)$ равны соответственно $97,29 \times 10^{-2}$ и $3,17 \times 10^{-2}$ для $\tau_d = 0$; $95,61 \times 10^{-2}$ и $6,94 \times 10^{-2}$ для $\tau_d = 5$ мкс; $92,76 \times 10^{-2}$ и $14,72 \times 10^{-2}$ для $\tau_d = 10$ мкс; $88,59 \times 10^{-2}$ и $30,79 \times 10^{-2}$ для $\tau_d = 15$ мкс.

Выполненная оценка показала, что достоверность принятых данных, равная $98,70 \times 10^{-2}$, достигается при наибольших значениях $P(0/0)$ и $P(1/1)$, которые с увеличением τ_d , в свою очередь, обеспечиваются при более высоких значениях n_{s0} и n_{s1} соответственно: $n_{s0} = 66,6 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$ и $n_{s1} = 35,0 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 0$; $n_{s0} = 74,1 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$ и $n_{s1} = 38,9 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 5$ мкс; $n_{s0} = 83,5 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$ и $n_{s1} = 43,7 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 10$ мкс; $n_{s0} = 95,6 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$ и $n_{s1} = 50,0 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 15$ мкс.

Заключение. Применительно к асинхронному двоичному несимметричному однородному однофотонному каналу связи без памяти и со стиранием, в котором в качестве приемного модуля используется счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа, получено выражение для расчета достоверности принятых данных. На основании этого выражения выполнено математическое моделирование канала связи, по результатам которого установлено, что с ростом средней скорости счета сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче символов 1 (n_{s1}) достоверность принятых данных D растет, достигая насыщения. Установлено, что при прочих равных параметрах с увеличением средней длительности мертвого времени продлевающегося типа насыщение зависимости $D(n_{s1})$ наблюдается при больших значениях средней скорости счета сигнальных импульсов n_{s1} .

Выполненные исследования также показали, что при прочих равных параметрах увеличение средней длительности мертвого времени продлевающегося типа τ_d приводит к уменьшению достоверности принятых данных за счет роста отношения $P(0/1) / P(1/1)$.

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 достоверность принятых данных для рассматриваемого канала связи.

Список используемых источников

1. Килин, С. Я. Квантовая криптография: идеи и практика / С. Я. Килин ; ред. С. Я. Килин, Д. Б. Хорошко, А. П. Низовцев. – Минск : Беларус. навука, 2007. – 391 с.
2. Гулаков, И. Р. Фотоприемники квантовых систем : монография / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. – Минск : УО ВГКС, 2012. – 276 с.
3. Тимофеев, А. М. Методика повышения достоверности принятых данных счетчика фотонов на основе анализа скорости счета импульсов при передаче двоичных символов «0» / А. М. Тимофеев // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 80–89.
4. 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.
5. Дмитриев, С. А. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы / С. А. Дмитриев, Н. Н. Слепов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ООО «Волоконно-оптическая техника», 2005. – 576 с.
6. Тузлуков, В. П. Вероятность ошибок при приеме сигналов по уплотненным каналам связи с ортогональным частотным разделением / В. П. Тузлуков // Доклады БГУИР. – 2017. – № 5(107). – С. 77–84.
7. 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.

8. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб. : Питер, 2012. – 944 с.
9. Reduced deadtime and higher rate photon-counting detection using a multiplexed detector array / S. A. Castelletto [et al.] // *J. of Modern Optics*. – 2007. – Vol. 54. – P. 337–352.
10. 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.
11. 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.
12. Ключев, Л. Л. Теория электрической связи / Л. Л. Ключев. – Минск : Техноперспектива, 2008. – 423 с.
13. Тимофеев, А. М. Энтропия потерь однофотонного асинхронного волоконно-оптического канала связи с приемником на основе счетчика фотонов с продлевающимся мертвым временем / А. М. Тимофеев // *Актуальные проблемы науки XXI века*. – 2018. – Вып. 7. – С. 5–10.
14. Тимофеев, А. М. Влияние времени однофотонной передачи информации на вероятность ошибочной регистрации данных асинхронных квантово-криптографических каналов связи / А. М. Тимофеев // *Вестник ГГТУ*. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 36–46.

References

1. Kilin S. Ya. Kvantovaya kriptografiya: idei i praktika. *Quantum Cryptography: Ideas and Practices*. In Kilin S. Ja., Horoshko D. B., Nizovcev A. P. (eds.). Minsk, Belaruskaja navuka, 2007, 391 p. (in Russian).
2. Gulakov I. R., Zenevich A. O. Fotopriemniki kvantovyih system. *Photodetectors of Quantum Systems*. Minsk, Vysshij gosudarstvennyj kolledzh svyazi, 2012, 276 p. (in Russian).
3. Timofeev A. M. Metodika povysheniya dostovernosti prinyatyih dannyih schetchika fotonov na osnove analiza skorosti scheta impulsov pri peredache dvoichnyih simvolov «0» [Methods of increasing the reliability of the received data of the photon counter based on the analysis of the pulse counting rate during the transmission of binary symbols «0»]. *Pribory i metody izmereniy [Devices and Methods of Measurements]*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 80–89 (in Russian).
4. Timofeev A. M. Otsenka vliyaniya prodlevayuschegosya mertvogo vremeni schetchika fotonov na veroyatnost oshibochnoy registratsii dannyih kvantovo-kriptograficheskikh kanalov svyazi [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(147), pp. 56–62 (in Russian).
5. Dmitriev S. A., Slepov N. N. Volokonno-opticheskaya tehnika: sovremennoe sostoyanie i perspektivy. *Fiber-Optic Technology: Current Status and Prospects*. Moscow, Volokonno-opticheskaya tehnika, 2005, 576 p. (in Russian).
6. Tuzlukov V. P. Veroyatnost oshibok pri prieme signalov po uplotnennym kanalim svyazi s ortogonalnyim chastotnyim razdeleniem [Probability of errors when receiving signals on sealed communication channels with orthogonal frequency separation]. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki [Doklady Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics]*, 2017, no. 5(107), pp. 77–84 (in Russian).
7. Scheglov A. Yu. Analiz i proektirovanie zaschityi informatsionnyih sistem. Kontrol dostupa k kompyuternym resursam: metody, modeli, tehnicheckie resheniya. *Analysis and Design of Information Systems Protection. Control of Access to Computer Resources: Methods, Models, Technical Solutions*. Saint Petersburg, Professional'naja literatura, 2017, 416 p. (in Russian).
8. Olfier V. G., Olfier N. A. Kompyuternye seti. Printsipy, tehnologii, protokoly. *Computer Networks. Principles, Technologies, Protocols*. Saint Petersburg, Piter, 2012, 944 p. (in Russian).
9. 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.
10. Zadeh I. E., Los J. W., Gourgues R. B., Steinmetz V., Bulgarini G., ..., 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.
11. Timofeev A. M. Ustroystvo dlya peredachi i priema dvoichnyih dannyih po volokonno-opticheskomu kanalu svyazi [Device for binary data transmitting and receiving over a fiber-optic communication channel]. *Pribory i metody izmereniy [Devices and Methods of Measurements]*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 17–27 (in Russian).
12. Klyuev L. L. Teoriya elektricheskoy svyazi. *The Theory of Electrical Communication*. Minsk, Tehnoperspektiva, 2008, 423 p. (in Russian).

13. Timofeev A. M. Entropiya poter' odnofotonnogo asinhronnogo volokonno-opticheskogo kanala svyazi s priemnikom na osnove schetchika fotonov s prodlevayuschimsya mertvyim vremenem [Entropy of losses of a single-photon asynchronous fiber-optic communication channel with a receiver based on a photon counter with prolonged dead time]. Aktualniye problemy nauki XXI veka [*Current Issues of Science in the 21st Century*], 2018, vol. 7, pp. 5–10 (in Russian).

14. Timofeev A. M. Vliyaniye vremeni odnofotonnoy peredachi informatsii na veroyatnost oshibochnoy registratsii dannyih asinhronnyih kvantovo-kriptograficheskikh kanalov svyazi [The effect of single photon transmission time on the probability of erroneous registration of asynchronous data of quantum cryptographic communication channels]. Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta [*Transactions of the Tambov State Technical University*], 2019, vol. 25, no. 1, pp. 36–46 (in Russian).

Информация об авторе

Тимофеев Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь.

E-mail: tamvks@mail.ru

Information about the author

Alexander M. Timofeev, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof. of the Department of Information Security, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus.

E-mail: tamvks@mail.ru