

УДК 621.383

Методика повышения достоверности принятых данных счетчика фотонов на основе анализа скорости счета импульсов при передаче двоичных символов «0»

А.М. Тимофеев

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

Поступила 11.01.2019

Принята к печати 28.02.2019

При измерении маломощных оптических сигналов приемные модули систем должны обеспечивать достаточно высокую достоверность принятых данных. В этой связи целесообразно использовать счетчики фотонов, которые являются высокочувствительными, однако характеризуются ошибками регистрации данных. Цель работы – оценка влияния средней скорости счета импульсов на выходе счетчика фотонов на достоверность принятой информации с учетом мертвого времени счетчика фотонов.

На основании статистических распределений числа импульсов на выходе счетчика фотонов получено выражение для оценки достоверности принятых двоичных данных при их регистрации в волоконно-оптическом канале связи.

Установлено, что с ростом средней скорости счета сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче символов «0» n_{s0} достоверность принятых данных вначале практически не изменяется и близка к единице, однако затем спадает. Причем при прочих равных параметрах с увеличением средней длительности мертвого времени продлевающегося типа τ_d спад этой зависимости наблюдается при больших значениях n_{s0} : при $n_{s0} \geq 66,6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 0$; при $n_{s0} \geq 74,1 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 5 \text{ мкс}$; при $n_{s0} \geq 83,5 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 10 \text{ мкс}$; при $n_{s0} \geq 95,6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 15 \text{ мкс}$.

Ключевые слова: достоверность принятой информации, счетчик фотонов, мертвое время.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-80-89

Адрес для переписки:

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

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

А.М. Тимофеев.
Методика повышения достоверности принятых данных счетчика фотонов на основе анализа скорости счета импульсов при передаче двоичных символов «0».
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 1. – С. 80–89.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-80-89

For citation:

A.M. Timofeev.
[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»].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 1, pp. 80–89 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-80-89

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»

A.M. Timofeev

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

Received 11.01.2019

Accepted for publication 28.02.2019

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 was to determine the effect of the average pulse count rate of photons at the output of the counter on the reliability of the received information with the dead time photon counter.

An expression for estimating the reliability of the received binary data when they were registered in the fiber-optic communication channel was obtained. This expression takes into account the statistical distributions of the number of pulses at the output of the photon counter.

Studies have shown that with increasing n_{s0} , the reliability of the data obtained at the beginning is practically does not change and is close to unity, and then decreases. Moreover, all other parameters being equal, with an increase in the average duration of the dead time of the prolonging type τ_d , this dependence decreases with large values of n_{s0} : with $n_{s0} \geq 66,6 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ for $\tau_d = 0$; with $n_{s0} \geq 74,1 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ for $\tau_d = 5 \mu\text{s}$; with $n_{s0} \geq 83,5 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ for $\tau_d = 10 \mu\text{s}$; with $n_{s0} \geq 95,6 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ for $\tau_d = 15 \mu\text{s}$.

Keywords: reliability of received information, photon counter, dead time.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-80-89

Адрес для переписки:

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

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

А.М. Тимофеев.
Методика повышения достоверности принятых данных счетчика
фотонов на основе анализа скорости счета импульсов при передаче
двоичных символов «0».
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 1. – С. 80–89.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-80-89

For citation:

A.M. Timofeev.
[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»].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 1, pp. 80–89 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-80-89

Введение

В настоящее время к приемникам оптической информации предъявляют достаточно высокие требования при измерении мощности оптического сигнала, что особенно актуально, когда уровень мощности сигнала соответствует в среднем от одного до нескольких десятков фотонов на каждый передаваемый бит (символ) [1–4]. Регистрация подобных маломощных оптических сигналов возможна посредством высокочувствительных приемных модулей – счетчиков фотонов, широко используемых в системах волоконно-оптической связи и позволяющих решать разнообразные задачи информационной безопасности: обеспечивать конфиденциальность и целостность данных, выполнять идентификацию данных и их отправителя и др. [1–8]. При этом весьма важно, чтобы приемное оборудование легитимных пользователей обеспечивало высокую достоверность принятых данных.

Под достоверностью принятых данных будем понимать вероятность того, что принятые данные соответствуют переданным.

Следует отметить, что на величину достоверности принятых данных будет влиять, в частности, мертвое время счетчика фотонов – время, в течение которого счетчик фотонов не чувствителен к падающему на него оптическому излучению [9–12]. Это объясняется тем, что в результате наличия мертвого времени счетчика фотонов возникают ошибки при регистрации оптической информации. Однако в литературных источниках отсутствует оценка влияния средней скорости счета импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче двоичных данных на достоверность принятой информации.

Объектом исследования являлся асинхронный двоичный несимметричный однородный волоконно-оптический 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 синхрои́мпульсов [13, 14]. Мертвым временем продлевающегося типа характеризуются счетчики фотонов на базе лавинных фотоприемников, включенных по схеме пассивного гашения лавины [5, 14].

Целью данной работы являлось установить влияние средней скорости счета импульсов на выходе счетчика фотонов на достоверность принятой информации при передаче данных по волоконно-оптическому каналу связи с учетом наличия мертвого времени счетчика фотонов.

Выражения для оценки достоверности принятых двоичных символов «0» и символов «1»

Дальнейшие рассуждения основаны на том, что передача информации осуществляется по волоконно-оптическому каналу связи двоичными символами («0» и «1») в течение длительности времени τ_b . Причем 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 длительности времени однофотонной передачи $\Delta t = \tau_b/2$, а прием – с помощью счетчика фотонов, выполненного на базе лавинного фотоприемника, включенного по схеме пассивного гашения лавины [5, 14]. Следовательно, в течение длительности 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 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 входе канала связи как $P_s(0)$ и $P_s(1)$ соответственно, вероятности появления символов «0» и «1» на выходе канала связи как $P'_s(0)$ и $P'_s(1)$ соответственно и вероятность того, что при передаче символа «0» или «1» на выходе счетчика фотонов не будет зарегистрировано ни символа «0», ни символа «1», как $P'_s(-)$.

Исходя из определения достоверности принятых данных, запишем выражения для расчета вероятности того, что принятые счетчиком фотонов символы «0» и символы «1» соответствуют переданным [13, 15]:

$$D_0 = 1 - P_{osh0} \quad \text{и} \quad D_1 = 1 - P_{osh1}, \quad (1)$$

где P_{osh0} и P_{osh1} – вероятности ошибочной регистрации символов «0» и «1» соответственно.

Входящие в выражения (1) вероятности P_{osh0} и P_{osh1} могут быть вычислены на основе формул [16]:

$$P_{osh0} = 1 - \sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}; \quad (2)$$

$$P_{osh1} = \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}, \quad (3)$$

где N_1 и N_2 – нижний и верхний пороговые уровни регистрации соответственно, 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, т.к. его длительность зависит от интенсивности оптического излучения [14, 16].

Темновые и сигнальные – это импульсы, которые появляются на выходе счетчика фотонов соответственно в отсутствии оптического сигнала и в результате воздействия фотонов регистрируемого излучения [14, 16].

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 [14, 16].

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». С учетом приведенных выше особенностей и классификации, представленной в [13, 15], рассматриваемый канал связи является волоконно-оптическим асинхронным двоичным несимметричным однородным без памяти и со стиранием.

Путем подстановки (2) и (3) в соответствующие формулы (1) запишем выражения для оценки достоверности принятых символов «0»:

$$D_0 = \sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} \quad (4)$$

и достоверности принятых символов «1»:

$$D_1 = 1 - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}. \quad (5)$$

Выражение для оценки достоверности принятых данных

Поскольку в общем случае принимаемые двоичные данные содержат как символы «0», так и символы «1», следовательно, для оценки достоверности принятых данных воспользуемся следующей формулой:

$$D = P'_s(0)D_0 + P'_s(1)D_1. \quad (6)$$

Анализ выражений (4), (5) и результатов, полученных ранее в работе [17], позволяет сделать вывод о том, что достоверности D_0 и D_1 равны соответственно $P(0/0)$ и $P(1/1)$ – вероятности регистрации на выходе канала связи символов «0» и символов «1» при наличии на входе канала связи символов «0» и «1». Тогда согласно [18] получаем:

$$D_0 = P(0/0) = 1 - P(1/0) - P(-/0); \quad (7)$$

$$D_1 = P(1/1) = 1 - P(0/1) - P(-/1), \quad (8)$$

где $P(1/0)$ и $P(0/1)$ – вероятности регистрации на выходе канала связи символов «1» и символов «0» при наличии на входе канала связи символов «0» и «1» соответственно, $P(-/0)$ и $P(-/1)$ – вероятности того, что на выходе канала связи не будет зарегистрировано ни символа «0», ни символа «1», в то время как на входе канала связи был сформирован символ «0» и символ «1» соответственно.

Сопоставив выражения (7), (8) с соответствующими формулами (1), можно убедиться в том, что вероятности $P(-/0)$ и $P(-/1)$ являются составляющими вероятностей ошибочной регистрации данных P_{osh0} и P_{osh1} . Вероятности $P(-/0)$ и $P(-/1)$ учитывают ошибки, которые имеют место, когда на выходе канала связи символ («0» или «1») не будет зарегистрирован. Возникают эти ошибки при регистрации счетчиком фотонов импульсов в количестве, меньшем, чем N_1 . Однако такие ошибки не будут влиять на достоверность приема символов «0» D_0 и символов «1» D_1 ,

поскольку в случае регистрации счетчиком фотонов импульсов в количестве, меньшем, чем N_1 , на выходе канала связи не регистрируется ни символ «0», ни символ «1» вне зависимости от того, какой символ был на входе канала связи. Учитывая приведенные выше рассуждения и исходя из определения достоверности принятых данных, формулы для расчета D_0 и D_1 запишем в следующем виде:

$$D_0 = \frac{P(0/0)}{P(0/0) + P(0/1)}; \quad (9)$$

$$D_1 = \frac{P(1/1)}{P(1/1) + P(1/0)}. \quad (10)$$

Переходные вероятности $P(0/0)$, $P(0/1)$ и $P(1/1)$, $P(1/0)$, входящие в соответствующие

выражения (9) и (10), могут быть рассчитаны на основании статистических распределений числа импульсов на выходе счетчика фотонов [17]:

$$P(0/0) = \sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}; \quad (11)$$

$$P(0/1) = \sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}; \quad (12)$$

$$P(1/1) = 1 - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}; \quad (13)$$

$$P(1/0) = 1 - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}. \quad (14)$$

Подставим выражения (11) и (12) в формулу (9), тогда достоверность принятых символов «0» равна:

$$D_0 = \frac{\sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}}{\sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} + \sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}}. \quad (15)$$

Формула достоверности принятых символов «1» может быть получена путем подстановки (13) и (14) в выражение (10), тогда:

$$D_1 = \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}}{2 - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}}. \quad (16)$$

Предположим, что на выходе рассматриваемого канала связи зарегистрирована случайная последовательность двоичных данных, для которой $P'_s(0) = P'_s(1) = 0,5$ [5, 18]. В этом

случае достоверность принятых данных определяется подстановкой формул (15) и (16) в выражение (6) и окончательно примет следующий вид:

$$D = 0,5 \times \left\{ \frac{\sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}}{\sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} + \sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}}{2 - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!}} \right\}. \quad (17)$$

Влияние средней скорости счета сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при регистрации двоичных символов «0» на достоверность принятых данных

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_{s0} .

На рисунке 1 представлены зависимости достоверности принятых данных от средней скорости счета сигнальных импульсов n_{s0} для различной средней длительности мертвого времени продлевающегося типа.

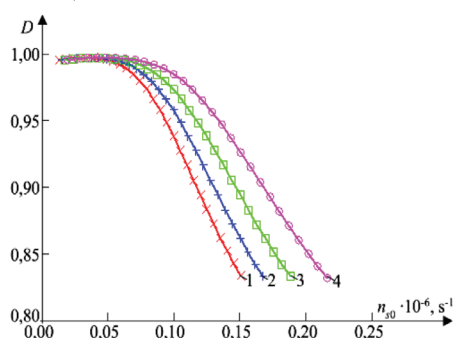


Рисунок 1 – Зависимость достоверности принятых данных от средней скорости счета сигнальных импульсов n_{s0} : $N_1 = 1$, $N_2 = 7$, $n_t = 10^3 \text{ c}^{-1}$, $\tau_b = 100 \text{ мкс}$; средняя длительность мертвого времени: 1 – $\tau_d = 0$, 2 – $\tau_d = 5 \text{ мкс}$, 3 – $\tau_d = 10 \text{ мкс}$, 4 – $\tau_d = 15 \text{ мкс}$

Figure 1 – Dependence of the reliability of the received data from the average count rate of the signal pulses n_{s0} : $N_1 = 1$, $N_2 = 7$, $n_t = 10^3 \text{ s}^{-1}$, $\tau_b = 100 \text{ }\mu\text{s}$; average dead time: 1 – $\tau_d = 0$, 2 – $\tau_d = 5 \text{ }\mu\text{s}$, 3 – $\tau_d = 10 \text{ }\mu\text{s}$, 4 – $\tau_d = 15 \text{ }\mu\text{s}$

Зависимости $D(n_{s0})$ построены в диапазонах средних скоростей счета сигнальных импульсов, на которых переходные вероятности $P(0/0) \geq 0,5$ при заданных средних длительностях мертвого времени продлевающегося типа. Это обусловлено тем, что для рассматриваемого канала связи при $P(0/0) < 0,5$ использование счетчиков фотонов для регистрации данных становится нецелесообразным. Для сравнения полученных зависимостей $D(n_{s0})$ величины средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s1} фиксировались постоянными и выбирались следующим образом. Вначале определялись диапазоны средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s1} , на которых переходные вероятности $P(1/1) \geq 0,5$ при заданных средних длительностях мертвого времени продлевающегося типа, по аналогии с выбором

диапазона значений n_{s0} . Затем из каждого полученного диапазона выбиралось оптимальное значение n_{s1} . При этом критерием оптимальности являлось наименьшее значение n_{s1} , при котором переходная вероятность $P(0/1)$ минимальна. Такой выбор скорости счета сигнальных импульсов n_{s1} позволяет обеспечить наибольшие значения 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 $n_t = 10^3 \text{ c}^{-1}$ и среднего времени передачи одного бита (символа) $\tau_b = 100 \text{ мкс}$. Необходимо также отметить, что пороговые уровни регистрации можно выбирать и другими, отличными от 1 и 7, но при сравнении зависимостей $D(n_{s0})$ для различных средних длительностей мертвого времени следует фиксировать N_1 и N_2 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. 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 рисунке 1.

Как видно из полученных результатов (см. рисунок 1), для всех исследуемых значений τ_d с увеличением средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s0} зависимости $D(n_{s0})$ вначале практически не изменяются и близки к единице, однако затем – спадают. Причем с увеличением средней длительности мертвого времени продлевающегося типа этот спад наблюдается при больших значениях n_{s0} . Так, например, зависимости $D(n_{s0})$ начинают уменьшаться соответственно при $n_{s0} \geq 66,6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 0$; при $n_{s0} \geq 74,1 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 5 \text{ мкс}$; при $n_{s0} \geq 83,5 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 10 \text{ мкс}$; при $n_{s0} \geq 95,6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 15 \text{ мкс}$.

Указанные особенности поведения зависимостей $D(n_{s0})$ объясняются характером изменения переходных вероятностей $P(0/0)$ и $P(1/0)$ с увеличением средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s0} , что иллюстрируется рисунком 2.

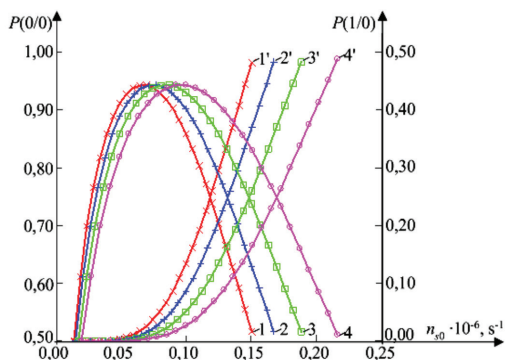


Рисунок 2 – Зависимости переходных вероятностей $P(0/0)$, кривые 1–4, и $P(1/0)$, кривые 1'–4', от средней скорости счета сигнальных импульсов n_{s0} : $N_1 = 1$, $N_2 = 7$, $n_t = 10^3 \text{ c}^{-1}$, $\tau_b = 100 \text{ мкс}$; средняя длительность мертвого времени: 1 и 1' – $\tau_d = 0$, 2 и 2' – $\tau_d = 5 \text{ мкс}$, 3 и 3' – $\tau_d = 10 \text{ мкс}$, 4 и 4' – $\tau_d = 15 \text{ мкс}$

Figure 2 – Dependences of transition probabilities $P(0/0)$, curves 1–4, and $P(1/0)$, curves 1'–4', on the average count rate of signal pulses n_{s0} : $N_1 = 1$, $N_2 = 7$, $n_t = 10^3 \text{ s}^{-1}$, $\tau_b = 100 \text{ }\mu\text{s}$; average dead time: 1 and 1' – $\tau_d = 0$, 2 and 2' – $\tau_d = 5 \text{ }\mu\text{s}$, 3 and 3' – $\tau_d = 10 \text{ }\mu\text{s}$, 4 and 4' – $\tau_d = 15 \text{ }\mu\text{s}$

Из рисунка 2 видно, что с увеличением средней скорости счета сигнальных импульсов n_{s0} вероятность регистрации на выходе канала связи символов «0» при наличии на входе канала связи символов «0» $P(0/0)$ растет, достигая наибольшего значения, после чего – спадает. Это имеет место как при наличии мертвого времени продлевающегося типа (рисунок 2, кривые 2–4), так и при его отсутствии (рисунок 2, кривая 1). Причем максимумы зависимостей $P(0/0)$ от n_{s0} наблюдаются при наименьших средних скоростях счета сигнальных импульсов n_{s0} , на которых соответствующие зависимости $D(n_{s0})$ спадают: при $n_{s0} = 66,6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 0$; при $n_{s0} = 74,1 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 5 \text{ мкс}$; при $n_{s0} = 83,5 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 10 \text{ мкс}$; при $n_{s0} = 95,6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 15 \text{ мкс}$.

Для всех исследуемых средних длительностей мертвого времени продлевающегося типа в диапазонах средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s0} , при которых соответствующие зависимости $P(0/0)$ от n_{s0} растут вплоть до своих максимальных значений, вероятности регистрации на выходе канала связи символов «1» при наличии на входе канала связи символов «0» $P(1/0)$ практически неизменны и близки к нулю. Однако в диапазонах n_{s0} , на которых соответствующие зависимости $P(0/0)$ от n_{s0} уменьшаются, зависимости $P(1/0)$ от n_{s0} растут (рисунок 2).

Такое поведение зависимостей $P(0/0)$ и $P(1/0)$ с ростом n_{s0} объясняется тем, что

статистические распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при регистрации символов «0» $P_{s0}(N)$ имеют явно выраженный максимум, свойственный распределению Пуассона [5, 14, 16]. При малых значениях n_{s0} этот максимум близок к $N = 0$ [16], поэтому $P(1/0) \approx 0$, а вероятность того, что на выходе канала связи не будет зарегистрировано ни символа «0», ни символа «1», в то время как на входе канала связи был сформирован символ «0» $P(-/0)$, достаточно большая. Это приводит к тому, что переходная вероятность $P(0/0)$ не достигает своего наибольшего значения. С увеличением n_{s0} происходит сдвиг максимумов статистических распределений $P_{s0}(N)$ в сторону больших значений N [16], следовательно, повышается вероятность регистрации на выходе счетчика фотонов импульсов в количестве $N_1 - N_2$. Это способствует уменьшению переходной вероятности $P(-/0)$ и росту переходной вероятности $P(0/0)$ вплоть до ее максимального значения. При дальнейшем увеличении средней скорости счета сигнальных импульсов n_{s0} максимумы статистических распределений $P_{s0}(N)$ продолжают сдвигаться в сторону еще больших значений N . Это приводит к увеличению вероятности того, что на выходе счетчика фотонов будет зарегистрировано импульсов в количестве, превышающем верхний пороговый уровень регистрации N_2 , поэтому переходные вероятности $P(-/0)$ и $P(0/0)$ уменьшаются, а переходная вероятность $P(1/0)$ растет.

В результате в диапазоне n_{s0} , на котором $P(1/0) \approx 0$, зависимость $D(n_{s0})$ практически неизменна и близка к единице (рисунок 1) за счет того, что отношение $P(1/0) / P(0/0) \approx 0$, что иллюстрируется рисунком 3.

В диапазоне n_{s0} , на котором с увеличением n_{s0} переходная вероятность $P(0/0)$ уменьшается и зависимость $P(1/0)$ от n_{s0} растет (рисунок 2), спад зависимости $D(n_{s0})$ объясняется ростом отношения $P(1/0) / P(0/0)$ с увеличением n_{s0} (рисунок 3).

Также из рисунка 2 видно, что в диапазонах средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s0} , на которых зависимости $P(0/0)$ от n_{s0} растут, увеличение средней длительности мертвого времени продлевающегося типа при прочих равных параметрах приводит к уменьшению переходных вероятностей $P(0/0)$. Это обусловлено тем, что при увеличении τ_d максимумы статистических распределений $P_{s0}(N)$ сдвигаются

в сторону меньших значений N [16]. В результате такого смещения повышается вероятность регистрации на выходе счетчика фотонов импульсов в количестве, меньшем, чем N_1 , поэтому $P(0/0)$ и $P(1/0)$ уменьшаются. Так, например, при $n_{s0} = 65,0 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ переходные вероятности $P(0/0)$ и $P(1/0)$ равны соответственно $94,33 \cdot 10^{-2}$ и $1,98 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_d = 0$; $93,74 \cdot 10^{-2}$ и $1,13 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_d = 5 \text{ мкс}$; $92,28 \cdot 10^{-2}$ и $0,58 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_d = 10 \text{ мкс}$; $89,81 \cdot 10^{-2}$ и $0,27 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_d = 15 \text{ мкс}$.

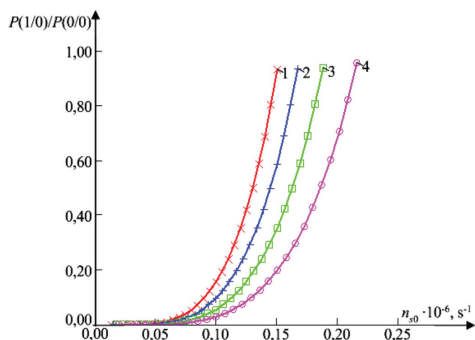


Рисунок 3 – Зависимость отношения $P(1/0)/P(0/0)$ от средней скорости счета сигнальных импульсов n_{s0} : $N_1 = 1$, $N_2 = 7$, $n_t = 10^3 \text{ c}^{-1}$, $\tau_b = 100 \text{ мкс}$; средняя длительность мертвого времени: 1 – $\tau_d = 0$, 2 – $\tau_d = 5 \text{ мкс}$, 3 – $\tau_d = 10 \text{ мкс}$, 4 – $\tau_d = 15 \text{ мкс}$

Figure 3 – Dependence of the ratio $P(1/0)/P(0/0)$ on the average count rate of the signal pulses n_{s0} : $N_1 = 1$, $N_2 = 7$, $n_t = 10^3 \text{ s}^{-1}$, $\tau_b = 100 \text{ }\mu\text{s}$; average dead time: 1 – $\tau_d = 0$, 2 – $\tau_d = 5 \text{ }\mu\text{s}$, 3 – $\tau_d = 10 \text{ }\mu\text{s}$; 4 – $\tau_d = 15 \text{ }\mu\text{s}$

В диапазонах средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s0} , на которых зависимости $P(0/0)$ от n_{s0} спадают, увеличение средней длительности мертвого времени продлевающегося типа при прочих равных параметрах также приводит к уменьшению переходных вероятностей $P(1/0)$, однако переходные вероятности $P(0/0)$ растут. Это объясняется тем, что в этих диапазонах значений n_{s0} максимумы $P_{st0}(N)$ располагаются в области достаточно больших значений N , поэтому весьма высока вероятность того, что на выходе счетчика фотонов будет зарегистрировано импульсов в количестве, превышающем верхний пороговый уровень регистрации N_2 . Однако при прочих равных параметрах с ростом τ_d в таких диапазонах значений n_{s0} эта вероятность уменьшается, поскольку максимумы статистических распределений $P_{st0}(N)$ смещаются в сторону меньших значений N . При этом повышается вероятность регистрации на выходе счетчика фотонов импульсов в количестве $N_1 - N_2$, поэтому увеличивается переходная вероятность $P(0/0)$

и уменьшается переходная вероятность $P(1/0)$. В результате, например, при $n_{s0} = 97,0 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ переходные вероятности $P(0/0)$ и $P(1/0)$ равны соответственно $86,94 \cdot 10^{-2}$ и $12,31 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_d = 0$; $90,85 \cdot 10^{-2}$ и $7,94 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_d = 5 \text{ мкс}$; $93,37 \cdot 10^{-2}$ и $4,65 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_d = 10 \text{ мкс}$; $94,35 \cdot 10^{-2}$ и $2,41 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_d = 15 \text{ мкс}$. В свою очередь, это приводит, к тому, что в диапазоне n_{s0} , на котором имеет место спад переходной вероятности $P(0/0)$, при прочих равных параметрах увеличение τ_d повышает достоверность принятых данных за счет уменьшения отношения $P(1/0)/P(0/0)$. Так, например, при $n_{s0} = 97,0 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ достоверность принятых данных D и отношение $P(1/0)/P(0/0)$ равны соответственно $94,28 \cdot 10^{-2}$ и $14,16 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_d = 0$; $96,10 \cdot 10^{-2}$ и $8,74 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_d = 5 \text{ мкс}$; $97,56 \cdot 10^{-2}$ и $4,98 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_d = 10 \text{ мкс}$; $98,61 \cdot 10^{-2}$ и $2,56 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_d = 15 \text{ мкс}$.

Таким образом, для достижения наибольшей достоверности принятых данных следует выбирать средние скорости счета сигнальных импульсов при передаче символов «0» n_{s0} , при которых для заданной величины средней длительности мертвого времени продлевающегося типа τ_d вероятность регистрации на выходе счетчика фотонов символов «0» при наличии на входе канала связи символов «0» $P(0/0)$ максимальна. Максимальные же значения $P(0/0)$, при которых достоверность принятых данных составляет $98,70 \cdot 10^{-2}$, с увеличением τ_d обеспечивают при более высоких значениях n_{s0} : при $n_{s0} = 66,6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 0$; при $n_{s0} = 74,1 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 5 \text{ мкс}$; при $n_{s0} = 83,5 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 10 \text{ мкс}$; при $n_{s0} = 95,6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 15 \text{ мкс}$.

Заключение

Получено выражение для расчета достоверности данных, принятых по двоичному волоконно-оптическому каналу связи, в котором в качестве приемного модуля используется счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа. Установлено, что с ростом средней скорости счета сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче символов «0» n_{s0} достоверность принятых данных D вначале практически не изменяется и близка к единице, однако затем спадает. Причем при прочих равных параметрах с увеличением средних длительностей мертвого времени продлевающегося типа τ_d спад зависимости $D(n_{s0})$ наблюдается при больших значениях средней скорости счета сигнальных

импульсов: при $n_{s0} \geq 66,6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 0$; при $n_{s0} \geq 74,1 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 5 \text{ мкс}$; при $n_{s0} \geq 83,5 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 10 \text{ мкс}$; при $n_{s0} \geq 95,6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 15 \text{ мкс}$.

Определено, что поведение зависимости $D(n_{s0})$ обусловлено характером изменения отношения вероятности регистрации на выходе канала связи символов «1» при наличии на его входе символов «0» $P(1/0)$ к вероятности регистрации на выходе канала связи символов «0» при наличии на его входе символов «0» $P(0/0)$ с ростом n_{s0} . Установлено, что в диапазонах n_{s0} , на которых имеет место спад зависимостей $D(n_{s0})$, при прочих равных параметрах увеличение τ_d повышает достоверность принятых данных D за счет уменьшения отношения $P(1/0)/P(0/0)$.

Полученные результаты могут быть использованы при создании систем квантово-криптографической асинхронной связи, позволяющих 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 видятся весьма важными исследования теоретического характера по оценке влияния средней скорости счета сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче символов «1» на достоверность принятых данных, что планируется выполнить в ходе дальнейших комплексных исследований.

Список использованных источников

1. 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
2. Zhang, J. Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication / J. Zhang [et al.] // Light: Science & Applications. – 2015. – Vol. 4. – P. 1–13. **DOI:** 10.1038/lsa.2015.59
3. 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. – P. 17448–17459. **DOI:** 10.1364/OE.18.017448
4. Корытко, Н.Н. Моделирование конструкции лавинных фотодиодов с охранными областями для регистрации маломощных световых потоков / Н.Н. Корытко [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2011. – Т. 2. – № 1(2). – С. 32–39.
DOI: 10.21122/2220-9506-2011-0-1-19-22
5. 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.
6. Румянцев, А.М. Эффективность синхронизации системы квантового распределения ключа на однофотонных лавинных фотодиодах / А.М. Румянцев, А.П. Пленкин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 9(182). – С. 4–15.
DOI: 10.18522/2311-3103-2016-9-415
7. Cova, S.D. Single-photon counting detectors / S.D. Cova, M. Ghioni // IEEE Photonics Journal. – 2011. – Vol. 3. – No. 2. – P. 274–277.
DOI: 10.1109/JPHOT.2011.2130518
8. Абед, А.Х. Метод шифрования передаваемой информации по случайному закону / А.Х. Абед // Вестник Томского государственного университета. – 2016. – Т. 22. – № 2. – С. 233–237.
DOI: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.233-237
9. Горцев, А.М. Оценка параметра непродлевающегося мертвого времени случайной длительности в пуассоновском потоке событий / А.М. Горцев, М.Е. Завгородняя // Вестник Томского государственного университета. – 2017. – № 40. – С. 32–40.
DOI: 10.17223/19988605/40/4
10. Castelletto, S.A. Reduced deadtime and higher rate photon-counting detection using a multi-plexed detector array / S.A. Castelletto [et al.] // Journal of Modern Optics. – 2007. – Vol. 54. – P. 337–352.
DOI: 10.1080/09500340600779579
11. 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. – P. 111301-1–111301-7.
DOI: 10.1063/1.5000001
12. Завгородняя, М.Е. Вероятностные характеристики потока событий с продлевающимся мертвым временем специального типа / М.Е. Завгородняя // Вестник Томского государственного университета. – 2018. – № 43. – С. 33–41.
DOI: 10.17223/19988605/43/4
13. Клюев, Л.Л. Теория электрической связи / Л.Л. Клюев. – Минск : Техноперспектива, 2008. – 423 с.
14. Гулаков, И.Р. Фотоприемники квантовых систем: монография / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич. – Минск : УО ВГКС, 2012. – 276 с.
15. Биккенин, Р.Р. Теория электрической связи / Р.Р. Биккенин, М.Н. Чесноков. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 336 с.
16. 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.

17. 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.

18. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – 12-е изд. / В.Е. Гмурман. – М. : Издательство Юрайт, 2018. – 479 с.

References

1. 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

2. 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

3. 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

4. Koritko N.N., Zalesskij V.B., Malishev V.S., Khatko V.V. [Simulation of avalanche photodiode construction with guard areas]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and methods of measurements], 2011, vol. 2, no. 1(2), pp. 32–39 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2011-0-1-19-22

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

6. Rumyantsev K.Yu., Pljonkin A.P. [The effectiveness of synchronization of quantum key distribution system at the single-photon avalanche photodiodes]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, no. 9(182), pp. 4–15 (in Russian).

DOI: 10.18522/2311-3103-2016-9-415

7. 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

8. Abed A.Kh. [Encryption method to transmit information at random]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University Journal], 2016, vol. 22, no. 2, pp. 233–237 (in Russian).

DOI: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.233-237

9. Gortsev A.M., Zavgorodnyaya M.E. [Estimation of the parameter of unextendable dead time random duration in the Poisson flow of events]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University Journal], 2017, no. 40, pp. 32–40 (in Russian).

DOI: 10.17223/19988605/40/4

10. 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

11. Zadeh I.E., Los J.W., Gourgues R.B., 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

12. Zavgorodnyaya M.E. [Probabilistic characteristics of the flow of events with prolonging dead time of special type]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University Journal], 2018, no. 43, pp. 33–41 (in Russian).

DOI: 10.17223/19988605/43/4

13. Klyuev L.L. *Teoriya ehlektricheskoy svyazi* [The theory of electrical communication]. Minsk, Techn.Perspect. Publ., 2008, 423 p.

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

15. Bikkenin R.R., Chesnokov M.N. *Teoriya ehlektricheskoy svyazi* [The theory of electrical communication]. Moscow, Publ. Cent «Academy», 2010, 336 p.

16. 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(147), pp. 56–62 (in Russian).

17. Timofeev A.M. [Entropy of losses of a single-photon asynchronous fiber-optic communication channel with a receiver based on a photon counter with prolonged dead time]. *Aktual'nye problemy nauki XXI veka* [Current issues of science in the 21st century], 2018, vol. 7, pp. 5–10 (in Russian).

18. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika* [Theory of probability and mathematical statistics]. Moscow, Publ. Yurayt, 2018, 479 p.